

ULUSLARARASI BESTSELLER

CHAD ORZEL

köpeğinize

# KUANTUM FİZİĞİNİ



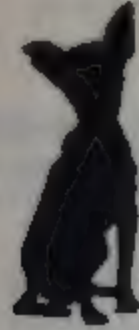
nasıl  
öğretirsiniz?





aylak kitap

# Köpeğimize Kuantum Fiziğini Nasıl Öğretirsiniz?



Chad Orzel

Çeviri  
Ebru Kılıç



aylak kitap

## **iÇİNDEKİLER**

### **GİRİŞ**

**Köpeğinize Neden Fizikten Bahsedeceksiniz?**

**Kuantum Fizikine Bir Giriş**

1

I.

**Hangi Yoldan? İkisinden de:**

**Parçacık-Dalga İkilemi**

9

II.

**Kemiğim Nerede Benim?**

**Heisenberg Belirsizlik İlkesi**

37

III.

**Schrödinger'in Köpeği:**

**Kopenhag Yorumu**

57

IV.

**Çok Dünya Çok Ödül:**

**Çoğul Dünyalar Yorumu**

85

V.

**Daha Gelmedik mi?**

**Kuantum Zeno Etkisi**

100



**VI.**

**Kazmaya Gerek Yok:  
Kuantum Tünelleme**

123

**VII.**

**Uzakta Tekinsiz Bir Havlama:  
Kuantum Dolayıklığı**

143

**VIII.**

**Bana Bir Tavşan Işınla:  
Kuantum Işınlaması**

171

**IX.**

**Peynirden Yapılmış Tavşancıklar:  
Sanal Parçacıklar ve Kuantum Elektrodinamiği**

195

**X.**

**Kötü Sincaplara Dikkat:  
Kuantum Fizikinin Kötüye Kullanılması**

217

**Önemli Terimlerin Sözlükçesi**

237

**Teşekkürler**

247

Köpeğimize Neden  
Kuantum

Mutluluk Huzuru Huzur  
sık sık benden yakınıma  
kayıp, anıyı düşünüyorum  
düşünüyorum. Yolum  
ve ben de oturup dışarı  
Benim yatağına otur  
benim kollarımın arkas  
bu köpeğe benlik, ama  
pişmanca ben kend  
da giriyorum.

Benim yatağına bir meler  
kullan. Çoğunlukla köpek  
benim ve ama çoğunlukla  
kullanıyorum. Benim de  
yatağına da ben ama p  
Benim yatağına  
Benim yatağına

## GİRİŞ

### Köpeğinize Neden Fizikten Bahsedeceksiniz? Kuantum Fiziğine Bir Giriş

Mohawk-Hudson Humane Society, Troy'un dışında bulunan tesislerinin hemen yakınındaki ormanın içine doğru küçük bir yol açmış, almayı düşündüğünüz köpekle birlikte burada yürüyüşe çıkabiliyorsunuz. Yolun kenarında, küçük bir açıklıkta bir bank var; banka oturup dışarı çıkardığım köpeğe bakıyorum.

Bankın yanına oturuyor, burnuyla elimi dürtüyor, ben de onun kulaklarının arkasını kaşıyorum. Karım ve ben birlikte birkaç köpeğe baktık; ama Kate'in işte olması gerektiğinden bir köpek seçmeye ben kendi başıma geldim. Bu köpek iyi bir tercih gibi görünüyor.

Bir yaşında bir melez; Alman çoban köpeğiyle başka bir cinsin kırması. Çoban köpeklerine özgü klasik siyah ve ten rengi tüyleri var, ama çoban köpeğinden daha küçük, kulakları da sarkık. Kulübesinin üstündeki levhada adının "Prenses" olduğu yazıyor yazmasına da bu ona pek uygun bir admış gibi durmuyor.

"Ne düşünüyorsun kızım?" diye soruyorum. "Seni nasıl çağırayım?"

"Bana Emmy de!" diyor.

"Neden o?"



"Çünkü adım bu, şapşal!"

Bir köpekten "şapşal" lafını işitmek biraz şaşırtıcı gelebilir, ama bir bildiği var herhalde. "Olur, bunu tartışamam. Peki, gelip bizimle yaşamak ister misin?"

"Eh, bakarız," diyor. "Yaratık durumu ne âlemde?"

"Efendim? Anlamadım..."

"Kovalamayı severim. Kovalayacağım yaratıklar olacak mı?"

"Ah tabii. Geniş denebilecek bir bahçemiz var, bir sürü de kuş ve sincap, ara sıra da tavşan."

"Ooo! Tavşanlara bayılırım!" Mutlu mutlu kuyruğunu sallıyor. "Peki ya yürüyüş meselesi? Yürüyüşe çıkacak mıyım?"

"Tabii."

"Peki ya ödül? Ödüllere bayılırım!"

"İyi bir köpek olursan ödül alırsın!"

Biraz içerlemiş görünüyor. "Ben çok iyi bir köpeğim. Sen de bana ödül vereceksin. Hayatını nasıl kazanıyorsun?"

"Ne? Neler oluyor bakalım? Kim kimi değerlendiriyor?"

"Benim kadar iyi bir köpeğe layık mısın değil misin anlamam lazım." Şu "Prenses" adı ona sandığımdan daha uygun olabilir.

"Ne iş yapıyorsun?"

"Karım Kate avukat, ben de Schenectady'de Union College'da fizik profesörüyüm. Atom fizigi ve kuantum optigi alanlarında ders verip araştırma yapıyorum."

"Kuantum nesi?"

"Kuantum optigi. Kabaca bir tanımla, ışığı ya da atomları ya da hem ışığı hem atomları kuantum fizigini kullanarak tanımladığın durumlarda ışık ile atomlar arasındaki etkileşimin incelenmesi."

"Kulağa epey karışık geliyor."

"Öyle, ama büyüleyici mevzular. Kuantum fiziginde her tür tuhaflık ve muhteşemlik var. Parçacıklar dalga gibi davranıyor, dalgalar parçacık gibi davranıyor. Parçacık özellikleri sen onları

...kadar henüz  
...parçacıklarla" diye  
"Hım." Düşüncel

...  
"Nedir o?"  
"Göbeğimi kaşı." S  
...kayyorum. Bir dak  
...mıdır, gayet iyisin.  
Köpek edinmeyle  
...tutuyoruz. Yür  
...nada bir şeyler öğren  
"Bir ara açıklamak

Çoğu köpek sahib  
...geçiniyorum. Soh  
...mobilyalara tırmanma  
...leniz kuantum fizig  
Köpeğime neden  
...böyle kazanıy  
...Sonuçta da kua  
...yorum.

Kuantum fizigi  
1900'den sonra keşle  
"modern fizik" bir  
...fizik kanı  
...kandır.

Klasik fizik, günde  
...oyuncaklarla  
...iletiyle ila  
...her şeyi

ölçene kadar belirsiz. Boş uzay birden ortaya çıkıp kaybolan "santal parçacıklar" doluyor. Çok iyi."

"Hmm." Düşünceli görünüyor ve sonra şöyle diyor: "Son bir sınav."

"Nedir o?"

"Göbeğimi kaşı." Sırt üstü dönüyor, ben de uzanıp göbeğini kaşıyorum. Bir dakika sonra ayağa kalkıyor, silkeleniyor, "Tamamdır, gayet iyisin. Hadi eve gidelim," diyor.

Köpek edinmeyle ilgili belgeleri doldurmak için kulübenin yolunu tutuyoruz. Yürürken "Kuantum fiziği, ha? Sanırım bu konuda bir şeyler öğrenmem gerekecek," diyor.

"Bir ara açıklamaktan memnuniyet duyarım."

Çoğu köpek sahibi gibi ben de köpeğimle konuşarak çok vakit geçiriyorum. Sohbetlerimizin çoğu hayli sıradan: Onu yeme, mobilyalara tırmanma; hadi, yürüyüşe çıkalım. Ama bazı sohbetlerimiz kuantum fiziği hakkında.

Köpeğime neden kuantum fiziğinden bahsediyorum? Eh, hayatımı böyle kazanıyorum: Ben bir üniversitede fizik öğretiyorum. Sonuçta da kuantum fiziğini düşünmeye çok vakit harcıyorum.

Kuantum fiziği nedir? Kuantum fiziği, yaklaşık olarak 1900'den sonra keşfedilen kanunlara dayanan fizik anlamında "modern fiziğin" bir parçasıdır. Yaklaşık olarak 1900'den önce geliştirilmiş fizik kanunları ve ilkeleri "klasik fizik" olarak değerlendirilir.

Klasik fizik, gündelik nesnelerle ilgili fiziktir: tenis topları ve gıcırtilı oyuncaklarla, ocaklar ve buz küpleriyle, mıknatıslar ve elektrik telleriyle ilgili fizik. Çıplak gözle görülebilecek kadar büyük her şeye klasik hareket kanunları hükmeder. Klasik termodinamik ısınan ve soğuyan nesnelerin fiziğini, motorların ve buzdolaplarının işleyişini açıklar. Klasik elektromanyetizma ampul-



lerin, radyoların ve mıknatısların davranış biçimini açıklar.

Modern fizikse, gündelik olanın ötesine geçtiğimizde gördüğümüz tuhaf dünyayı betimler. Bu dünya ilk kez, 1800'lerin sonunda, 1900'lerin başında gerçekleştirilen; klasik fizik kanunlarıyla açıklanamayacak deneylerle gözler önüne serilmiştir.

Modern fizik, her biri klasik fizik kurallarından kökten bir ayrılık anlamına gelen iki kısma ayrılır. Bunlardan biri, görelilik, çok hızlı hareket eden ya da güçlü kütleçekim kuvvetlerinin yakınında bulunan nesnelerle ilgilenir. Albert Einstein göreliliği 1905'te ortaya koymuştur; görelilik başlı başına büyüleyici bir konudur, fakat bu kitabın kapsamı dışındadır.

Modern fiziğin ikinci kısmıysa köpeğime anlattığım konudur. Modern fiziğin ışık ve moleküller, tek tek atomlar, atomaltı parçacıklar gibi çok küçük şeylerle ilgilenen kısmına kuantum fiziği ya da kuantum mekaniği adı verilmiştir. Max Planck "kuantum" terimini 1900'de geliştirmişti, Einstein da ışıkla ilgili ilk kuantum kuramını sunarak Nobel Ödülü kazanmıştı.<sup>2</sup> Kuantum mekaniği kuramı bunu izleyen otuz yıl içinde geliştirilmiştir.

Planck gibi ilk öncülerden, hidrojen atomunun ilk kuantum modelini çıkaran Niels Bohr'dan tutun bugün "kuantum elektrodinamiği" dediğimiz alanda bağımsız olarak çalışmalar yürüten Richard Feynman'a, Julian Schwinger'a varıncaya kadar kuantum kuramını oluşturan bilim insanları haklı olarak fiziğin devleri olarak görülür. Kuantum kuramının bazı unsurları fizik alanından dışarı çıkıp popüler imgelemin dikkatini çekmiştir: Werner Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, Erwin Schrödinger'in kedi paradoksu, Hugh Everett'in çoğul dünyalar yorumundaki paralel evrenler gibi.

1- "Kuantum fiziği", "kuantum kuramı", "kuantum mekaniği" terimleri az çok birbirinin yerine geçebilir.

2- Göreliliğin keşfine pek dokunmuyordu; ama Einstein'e Nobel verilmesinin resmi gerekçesi fotoelektrik etkiye ilişkin kuantum kuramıydı.



Kuantum mekaniği olmasaydı modern hayat imkânsız olurdu. Elektronun kuantum niteliği anlaşılmış olmasaydı bilgisayarlarımızı çalıştıran yarı iletken yongaların yapılması imkânsız olurdu. Işığın ve atomların kuantum niteliği anlaşılmamış olsaydı fiber optik iletişim hatlarından mesaj göndermek için kullandığımız lazerlerin yapılması imkânsız olurdu.

Kuantum kuramının bilim üzerindeki etkileri salt pratik olanın ötesine geçer, fizikçileri felsefi meselelerle boğuşmak zorunda bırakır. Kuantum fiziği evren hakkında bilebileceklerimize ve evrendeki nesnelerin özelliklerine sınırlamalar getirir. Hatta kuantum mekaniği, bir ölçüm yapmanın ne demek olduğuna dair anlayışımızı değiştirir. Gerçekliğin doğasının en temel düzeyde tam anlamıyla yeniden düşünülmesini gerektirir.

Kuantum mekaniği, hiçbir şeyin kesin olmadığı ve nesnelerin onları ölçünceye dek kesin özelliklere sahip olmadığı son derece tuhaf bir dünya betimler. Uzaktaki nesnelerin tuhaf biçimlerde birbirine bağlandığı, bizim evrenimizin yanı başında farklı tarihlere sahip koskoca evrenlerin var olduğu, "sanal parçacıkların" bomboş uzayda birden belirip kaybolduğu bir dünyadır bu.

Kuantum fiziği kulağa fantezi kurgu gibi gelebilir, ama bilimdir. Kuantum kuramında betimlenen dünya, mikroskobik ölçekte<sup>3</sup> bizim dünyamızdır. Kuantum fiziğinin öngördüğü tuhaf etkiler gerçektir, gerçek sonuçları ve uygulamaları vardır. Kuantum kuramı inanılmaz düzeyde bir kesinlikle sınanmıştır; bu da onu bilimsel kuramlar tarihinin en geçerli biçimde sınanmış kuramı haline getirmektedir. Kuantum kuramının en tuhaf tahminleri bile deneysel olarak doğrulanmıştır. (Yedinci, sekizinci ve doku-

3- Bir fizikçi için "mikroskobik", çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük şeyleri ifade eder. Bu terim bakterilerden tutun atomlara, elektronlara varıncaya kadar çok geniş bir yelpazeyi kapsar. Geniş bir büyüklük yelpazesi içerir; ama fizikçiler küçük şeyleri ifade etmek için birden fazla kelime kullanmanın kafa karıştırıcı olacağı kanısındadır.

zuncu bolumlerde gorecegiz.)

İşte bu yüzden kuantum fiziği zevkli bir mevsurdur. Peki ama köpeklerle ne ilgisi var?

Köpekler kuantum fizigine baslarken çoğu insandan daha iyi bir konumdadır. Dunyaya insanlar kadar onyargıyla yaklaşımazlar her zaman da beklenmedik olanı beklerler. Bir köpek bir yıl boyunca aynı caddeden vuruyabilir ve bu her seferinde onun için yeni bir deneyim olabilir. Her taş her çalı, her ağaç daha önce hiç kokanmamış gibi koklanacaktır.

Köpeklerle verilen öduller bir mutlugin ortasında boş uzayda aniden beliverseydi birçok insanın odu kopardı, ama köpekler böyle bir şey karşısında istifini bozmadı. Hatta çoğu köpek için kendiliğinden beliren öduller hak edilmiş olur, köpekler hep ödullerin her an belli bir sebep olmaksızın belivermesini bekler.

Kuantum mekanığı insanlara bogucu ve sıkıcı gelir, çünkü dunyanın işleviyle ilgili sagduvuya dayalı beklentilerimize karşı çıkar. Köpekler kabule daha açık dinlevicilerdir. Bir köpek için gündelik dunya tuhaf ve harika bir verdir, kuantum kuramının ongoruieri de söz gelimi bir kapı kolunun işleviinden daha tuhaf ya da harika değildir.\*

Köpeğimle kuantum fizigini tartışmak yararlı, çünkü kuantum fizigini insanlarla nasıl tartışacağımı anlamamı sağlıyor. Kuantum mekanığını öğrenmek kısmen bir köpek gibi düşünmeyi öğrenmektir. Dunyaya bir köpeğin baktığı gibi bakabilirseniz, onu sonu gelmez bir surpriz ve hayret kaynağı olarak görebilirseniz kuantum mekanığı daha yaklaşılabılır görünecektir.

Bu kitapta köpeğimle kuantum fiziği hakkında yaptığım sohbetleri yeniden urettim. Her sohbetin ardından, konuyla ilgilenen insan okariara yönelik anlatılan fizikle ilgili aydınlatıcı bir tar-

\* Kapı kolu da kuşkusuz hak kurallarına uygun işler ama nihayetinde parmakların kadamımasını gerektirir.



uşıma geliyor. Konular, parçacık-dalga ikilemi (birinci bölüm), belirsizlik ilkesi (ikinci bölüm) gibi birçok kişinin duymuş olduğu fikirlerden sanal parçacıklar ve kuantum elektrodinamığı (dokuzuncu bölüm) gibi daha ileri fikirlere doğru uzanan bir yelpazeye dağılıyor. Bu açıklamalar hem kuramın tuhaf tahminlerini (gerek uygulamayla ilgili gerek felsefi) hem bu tahminleri gösteren deneyleri tartışıyor. Köpeklerin en ilginç bulduğu şeylerden seçildiler, insanların da şaşırtıcı bulabileceği kısımları aydınlatıyorlar.

"Bilmem. Bence. bence biraz daha şey şey lazım "

"Ne lazım?"

"Benim hakkımda biraz daha fazla şey. Benim istisnai derecede akıllı bir köpek olduğumdan bahsetmiyorsun "

"Eh, peki.. "

"İstisnai derecede sevimli olduğumdan da "

"Kesinlikle, ama . "

"İyi olduğumu da unutma. Obur köpeklerden kat kat iyiyim "

"Hangi obur köpekler?"

"Ben olmayan köpekler "

"Bak, bu gerçekten de fizik hakkında bir kitap, senin hakkındadır değil "

"Evet, ama daha fazla benim hakkımda olmalı, benim bütün söyledığım de bu zaten "

"Ama öyle değil, senin de buna ayak uydurman gerek "

"Eh, iyi o zaman. Ama fizik mevzuunda bana ihtiyacın olacak "

"Ne demek istiyorsun?"

"Eh, bazen bazı şeyleri dışarıda bırakıyorsun, sorularımın da hepsini yanıtlamıyorsun. Böyle yapmamalısın "

"Nasıl mesela? Bir örnek ver "

"Hmm. Şimdi aklıma gelmiyor. Ama bana okursan gösteririm ve halletmene yardım ederim "

"Peki, kulaga hoş geliyor. Bak şöyle yapalım. Birlikte kitabın üzerinden geçelim, bazı şevleri dışarıda bıraktığımızı düşündüğün yerler olursa üstüne konuşabiliriz ve ben de senin yorumlarını kitaba koyarım."

"Şimdi yaptığımız gibi mi konuşacağız?"

"Evet, şimdi yaptığımız gibi."

"Konuşmamızı kitaba koyacaksın, öyle mi?"

"Evet, koyacağım."

"O zaman ne kadar ıy! ne kadar sevimli olduğumdan da bahsetmeliyiz, daha fazla ödül almam gerektiğinden ve "

"Peki, tamam, bu kadar yeter."

"Şimdilik."

Hangi Yol  
Parçacı



## I

### Hangi Yoldan? İkisinden de: Parçacık-Dalga İkilemi



Yürüyüş yapıyoruz, kopeğim bir sincap görünce alıp başını onun peşine düşüyor. Sincap bir bahçeye kaçıp bodur bir süs akçağacının arkasına sığılıyor. Emmy yolunu en ufak bir biçimde değiştirmiyor, ağaca bindirmesine ramak kalmışken onu çekiyorum

"Bunu neden yaptın?" diye hiddetle soruyor.

"Ne demek istiyorsun? Ağaca çarpacaktın, seni durdurdum "

"Hayır, çarpmayacaktım." Bahçe duvarının öbür tarafında artık daha büyük bir ağacın tepesine çıkmış olan sincaba bakıyor "Kuantum yuzunden."

Yeniden yurumeye başlıyoruz "Peki, ama bunu açıklamam gerek," diyorum.

"Bak, şöyle bir planım vardı," diyor. "Bılırsın, arka bahçede tavşanları kovalarken goletin sağına koştuğumda onlar sola koşup kaçarlardı ya?"

"Evet."

"Ben goletin soluna koştuğumda da onlar sağa koşup kaçarlardı?"

"Evet "

"Pekala, ben de yeni bir koşma biçimi düşündüm, artık kaça-



mayacaktır

"Ne? Göletin ortasından mı koşacaksın? " Gölet sadece 15-16 santim derinliğinde ve bir-iki metre uzunluğunda

"Havır sapsak Her iki yoldan da gideceğim Tavşanları benim aramda sıkıştıracağım."

"Hi hi... İlginç... İlginç bir teori."

Bu bir teori değil kuantum fiziği Madde parçacıklarının dalga niteliği vardır ve nesnelerin etrafında kırılabilirler Bir engelin üzerine bir elektron huzmesi gönderirsen aynı anda engelin hem sağından hem solundan geçecektir " Gerçekten de meseleyi kapı var, caddenin karşısındaki bahçede güneşlenen kediyi fark etmiyordun bile İşte bu yüzden ben de dalga niteliğini kullanacağım ve göletin her iki tarafından da gideceğim "

"İyi de bir ağaca bodoslama dalmak nereden çıkıyor? "

"Ah, evet " Biraz alımkı bir halı var "Önce biraz küçük bir şey üzerinde denemem gerektiğini düşündüm Koşuya güzel bir başlangıç yapmıştım, beni durduğunda tam hem sağa hem sola gitmek üzereydim "

"Ha şu mesele "Söylemiştim ilginç bir teori İse varamaz, bilvorsun "

"Benim dalga niteliğim olmadığını iddia etmeyeceksin herhalde, değil mi? Çünkü var Senin fizik kitaplarında ovle diyor "

"Havır, havır Dalga niteliğin var, onda bir sorun yok. Buda niteliğin de var."

"Aydınlanmış bir köpeğim ben! "

"Bu da senin çok işine varavacak Bak şimdi ağaç büyüktür senin dalga boyun da küçük Yürüme hızında senin gibi yirmi kiloluk bir köpeğin yaklaşık 10 ' metrelik bir dalga boyu vardır İkiye ayrılıp etrafını dolaşabilmek için dalga boyunun ağacın boyuna uygun belki on santim olması gerekir oysa sen bundan 34 kat daha büyüksün

"Eh ben de momentumumu değiştirerek dalga boyumu de-

göstürürüm Çok hızlı koşabilirim "

"İyi atış, ama hızlanırsan dalga boyun kısalır Dalga boyunu yaklaşık bir milimetreye çıkarmak ve ağacın etrafını ikiye ayrılarak dolaşabilmek için saniyede  $10^{10}$  metre hızla hareket ediyor olman lazım bu da inanılmaz derecede yavaştır Bu hızla bir atomun çekirdeğini aşmak bir milyar yıl alabilir, bir tavşanı yakalamak için çok çok yavaş "

"Yeni bir plana ihtiyacım olduğunu mu söyluyorsun?"

"Yeni bir plana ihtiyacın var."

Kuyruğu düşüyor, birkaç saniye sessizlik içinde yuruyoruz "Hey" diyor, "Yeni planımda bana yardımcı olur musun?"

"Denerim "

"Aynı anda göletin her iki tarafından da geçmek için Buda niteliğimi nasıl kullanırım?"

Söyleyecek bir şey bulamıyorum, tam o sırada gri bir kürk parıltısı imdadıma yetişiyor. "Bak! Bir sincap!" diyorum.

"Ooo!" İşte yine takipteyiz

Kuantum fizığının birçok tuhaf ve büyölevici yönü vardır, ama kuramı başlatan keşif, parçacık-dalga ikilemi, daha doğrusu, hem ışığın hem maddenin aynı anda hem parçacık benzeri hem dalga benzeri özelliklere sahip olması olmuştur. Genelde bir dalga olduğu düşünülen bir ışık huzmesinin bazı deneylerde bir parçacık akışı gibi davrandığı ortaya çıkmıştır Genelde bir parçacık akışı olduğu düşünülen bir elektron huzmesinin de bazı deneylerde dalga gibi davrandığı anlaşılmıştır. Parçacık ve dalga özellikleri birbirine ters düşüyormuş gibi görünmektedir; gelgelelim evrende her şey bir şekilde hem dalga hem parçacık olmayı becermektedir.

Işığın bir parçacık gibi davrandığının 1900'lerin başlarında keşfedilmesi, bütün kuantum mekaniğinin başlangıç noktası oldu Bu bölümde, fizikçilerin bu tuhaf ikiliği keşfetmelerinin ta-

nihini anlatacağız. Fakat bunun ne kadar tuhaf bir gelişme olduğunu değerlendirebilmek için gündelik hayatta gördüğümüz parçacıklar ve dalgalardan bahsetmemiz gerekiyor.

## Çevrenizdeki Parçacıklar ve Dalgalar: Klasik Fizik

Maddi parçacıkların davranışına herkes aşındır. Çevrenizde gördüğünüz nesnelerin hayli büyük bir bölümü, kemikler, topolar, gıcirtılı oyuncaklar klasik anlamda parçacık gibi davranır; hareketleri klasik fizikle belirlenir. Şekilleri farklıdır, fakat her birinin bir kütlesi olan küçük, özelliiksiz bir top, bir parçacık olduğunu hayal ederek ve Newton'ın<sup>1</sup> hareket kanunlarını uygulayarak aklı hareketlerini tahmin edebilirsiniz. Bir tenis topu ve havada taklalar atan uzun bir kemik, uçuş sırasında birbirinden farklı görünür, ama aynı yone aynı hızla fırlatıldıklarında aynı yere ineceklerdir ve siz, klasik fizik kurallarına başvurarak bu yeri kestirebilirsiniz.

Parçacık benzeri bir nesnenin belli bir konumu vardır (tam olarak nerede olduğunu bilirsiniz), belli bir yönlü hızı vardır (hangi yone hangi hızla hareket ettiğini bilirsiniz) ve belli bir kütlesi vardır (ne kadar büyük olduğunu bilirsiniz). Kütle ve yönlü hızı çarparak momentumu bulabilirsiniz. Kocaman bir Labrador retriever'in momentumu onunla aynı hızda yol alan kü-

1 Yere düşen elma hikâyesindeki Sir Isaac Newton hareket eden nesnelerin davranışlarına hükmeden uç hareket kanunu ortaya koymuştur. İlk sureddurum ilkesidir. Dışarıdan bir kuvvet uygulanmadığı sürece duran nesneler hareket eden nesnelerse hareket etme eğilimindedir. İkinci kanun ilkinin niceliksel hale getirir ve genellikle  $F=ma$  denklemi şeklinde yazılır. Kuvvet eşittir, kütle çarpı ivme. Üçüncü kanun her eylemin eşit bir karşı eylem tepki, ters yönde aynı ölçüde güçlü bir kuvvet doğurduğunu söyler. Bu uç kanun gündelik hızlarda makroskobik nesnelerin hareketini belirler ve klasik fizik fizin çekirdeğini oluşturur.

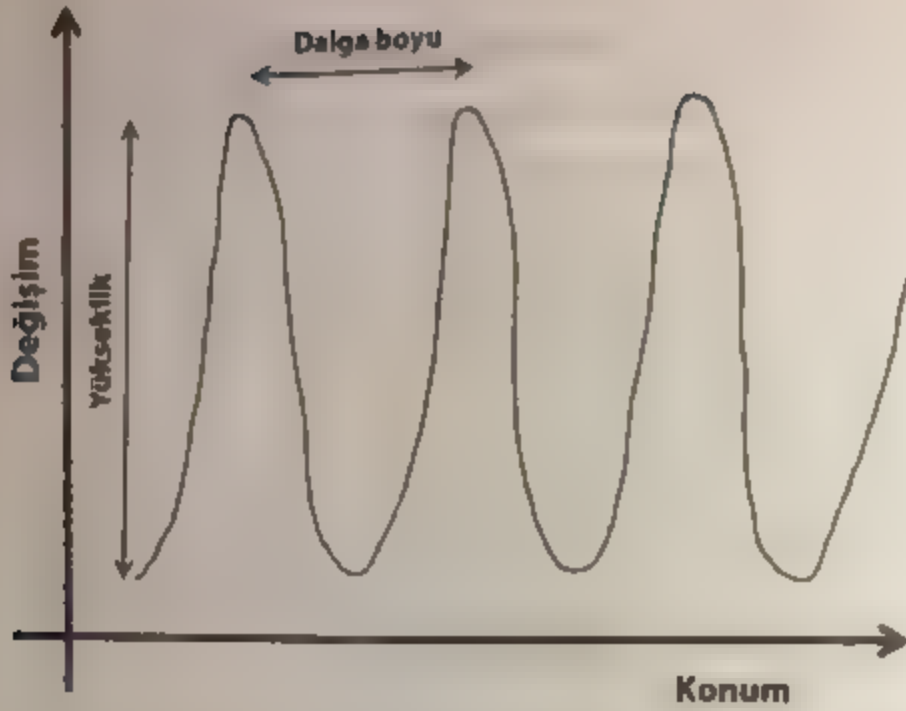


çok bir Fransız kanışının momentumundan daha büyüktür, hızlı hareket eden bir İskoç çoban köpeğinin momentumu da onunla kutlesi aynı olan paytak yuruyuşlu bir Basset hound'dan daha fazladır. İki parçacık çarpıştığında neler olacağını momentum belirler. Hareket eden bir nesne duran bir nesneye çarptığında, hareket eden nesne yavaşlayıp momentumunu yitirecektir; duran nesneyse hızlanıp momentum kazanacaktır.

Parçacıkların bir diğer dikkat çekici özelliği, lafı bile edilemeyecek kadar aşıkarmış gibi görünen bir şeydir: Parçacıklar sayılabilir. Elinizde bir nesne koleksiyonu varsa onlara bakıp tam olarak hangisinden kaç tane olduğunu söylevebilirsiniz. Bir kemik, iki gıcırutlu oyuncak, arka bahçedeki ağacın altında üç sincap.

Oysa dalgalar daha ele geçmezdir. Bir dalga, bir şeyin içinde hareket eden karışıklıktır; tıpkı arka bahçedeki göletin içinde suyun çalkalanmasıyla oluşan tepe ve çukur örüntüleri gibi. Dalgalar doğaları gereği uzayın bir bölgesine yayılırlar, zaman içinde değişen ve hareket eden bir örüntü oluştururlar. Bir yere giden fiziksel bir nesne yoktur, su göletin içinde kalır; fakat karışıklık örüntüsü değişir ve biz de bunu bir dalganın hareketi olarak görürüz.

Bir dalgayı anlamak istiyorsanız, yararlı bir bilgi edinecek şekilde ona bakmanın iki yolu vardır. Biri koca bir dalganın fotoğrafını çektiğinizi düşünmek ve uzamdaki karışıklık örüntüsüne bakmaktır. Tek bir basit dalgada, düzenli bir tepeler ve çukurlar örüntüsü görürsünüz, bunun gibi



Örüntüde ilerlerseniz ortamın, dalganın "büyüklüğü" denen miktarda aşağı yukarı inip çıkışını görürsünüz. Birbirine komşu iki dalga tepesi (ya da çukuru) arasındaki uzaklığı ölçtüğünüzde "dalga boyu" nu ölçmüş olursunuz ve bu da bir dalgayı betimlemekte kullanılan rakamlardan biridir.

Yapabileceğimiz diğer şey küçük bir parça dalga örüntüsüne bakmak ve onu uzun bir süre izlemektir. Bir golde dalıp çıkan bir ordeği izlediğinizi düşünün. Dikkatle izlerseniz karışıklığın çok düzenli bir biçimde buyuyup küçüldüğünü, ordeğin bazen yükseleli bazen de alçaldığını zamanla uzamındaki örüntüye çok benzeyen bir örüntü oluşturduğunu görürsünüz. Dalganın belli bir süre zarfında ne kadar sıklıkla kendini tekrarladığını, ordeğin bir dakika içinde azami yüksekliğe kaç kere ulaştığını ölçebilirsiniz. Bu size dalganın "frekansı" nı verir. Frekans da dalgayı tanımlarken kullanılan bir başka önemli rakamdır. Dalga boyu ve frekans birbirine ilişkilidir. Uzun dalga boyu düşük frekans, kısa dalga boyu yüksek frekans anlamına gelir.

Dalgaların parçacıklardan nasıl farklı olduğunu artık görebili-

yorsunuzdur Dalgaların konumu yoktur. Dalga boyu ve frekans bir bütün olarak örüntüyü betimler, ama dalganın konumu olarak gösterip tanımlayabileceğiniz tek bir yer yoktur Dalganın kendisi uzaya yayılmış bir karışıklıktır, belli bir konumu ve yönlü hızı olan fiziksel bir şey değildir. Dalganın tepelerinden birinin, bir konumdan diğerine hareket etmesinin ne kadar sürdüğüne bakarak dalga örüntüsüne bir yönlü hız atfedebilirsiniz, fakat yine de bu bir bütün olarak örüntünün özelliğidir.

Ayrıca parçacıkları sayabildiğiniz gibi dalgaları sayamazsınız; belli bir bölgede dalganın kaç tepesi ve çukuru olduğunu söyleyebilirsiniz, fakat bunların hepsi de tek bir dalga örüntüsünün parçalarıdır. Dalgalar sürekli, parçacıklar birbirinden ayrıdır; bir, iki ya da uç parçacığınız olduğunu söyleyebilirsiniz; ama dalga ya vardır ya yoktur Tek tek dalgaların yükseklikleri büyük ya da küçük olabilir; ama dalgalar parçacıklar gibi gruplar halinde değildir, bazen iki dalgayı bir araya getirdiğinizde karşınıza daha büyük bir dalga çıkar, bazen de hiç dalga olmaz.

Aynı bölgede iki farklı dalga kaynağı olduğunu düşünün, orneğin durgun suya aynı anda iki taş atılmış olsun. İki dalgayı birbirine eklerseniz ne elde edeceğinizi dalgaların nasıl sıralandığına bağlıdır İki dalgayı birinin tepelerinin diğerinin tepelerinin üstüne, birinin çukurlarının diğerinin çukurlarının üstüne geleceği şekilde yerleştirirseniz (bu tür dalgalara "aynı fazda" denir) başlangıçtaki iki dalgadan daha büyük bir dalga elde edersiniz Öte yandan, dalgalardan birini tepeleri diğerinin çukurlarının üstüne gelecek şekilde ya da çukurları diğerinin tepelerinin üstüne gelecek şekilde yerleştirirseniz ("zıt fazlı") ikisi birbirini iptal edecek, sonuçta elinizde hiç dalga olmayacaktır.

Bu fenomene girişim denir, girişim dalgalar ve parçacıklar arasındaki belki de en önemli farklılıktır

"Bilmem. . Bu çok tuhaf Başka girişim örnekleri var mı gösterebileceğin? Biraz daha Ne bileyim, kopeksi bir örnek?"



"Hayır gerçekten de yok. Mesele de bu zaten. Dalgalar aralarında çok çok farklıdır. Köpeklerin düzenli olarak hiçbir şey dalgaya benzeri değildir."

"Peki, şuna ne dersin? Arka bahçeye bir sincap koyarsın, sonra bir de köpek, bir dakika sonra arka bahçede hiç sincap görünmüyor, böyle bir 'girisim' olamaz mı?"

"O girişim değil, av takibi. Bak, girişim daha ziyade şeye. Arka bahçeye bir sincap koyuyorsun, bir saniye sonra bir sincap daha koyuyorsun, sonra bir bakıyorsun hiç sincap yok, ama ikinci sincabı koymadan önce iki saniye beklersen, denizden sincap buluyorsun."

"Anlaşıldı, bu gerçekten de tuhaf."

"Benim demek istediğim de bu."

"Fh, peki o halde lvi iş çıkarmışsın. Ama biz neden bunu konuşuyoruz?"

"Çünkü kuantum fizikini anlayabilmen için dalgalar hakkında birkaç şey bilmen gerekiyor."

"Evet, ama bu bana matematikmiş gibi geliyor. Matematiği sevmem. Fizikten ne zaman bahsedeceğiz?"

"Fizikten bahsediyoruz. Fizik'in bütün amacı, evreni betimlemek için matematiği kullanmaktır."

"Evreni betimlemek istemiyorum. Sincap yakalamak istiyorum."

"Bak, evreni matematikle nasıl betimleyebileceğini bilmen sincap yakalamayı sağlayabilir. Sincapların nerede olduğuna ilişkin matematiksel bir modelin varsa, onların davranışlarını ve nelerden kuralları biliyorsan modelin sincapların bundan sonra nerede olacağını tahmin etmekte kullanabilirsin. Nerede olacaklarını tahmin edersen de."

"Sincapları yakalayabilirim!"

"Aynen öyle."

"Peki tamam. Matematiği evvallah. Yine de bu dalgaya mesele."

sının neye yaradığını anlayamadım.”

“Işık ve ses dalgalarının özelliklerini açıklamamız gerekiyor, sırada o var ”

## Gündelik Hayatta Dalgalar: Işık ve Ses

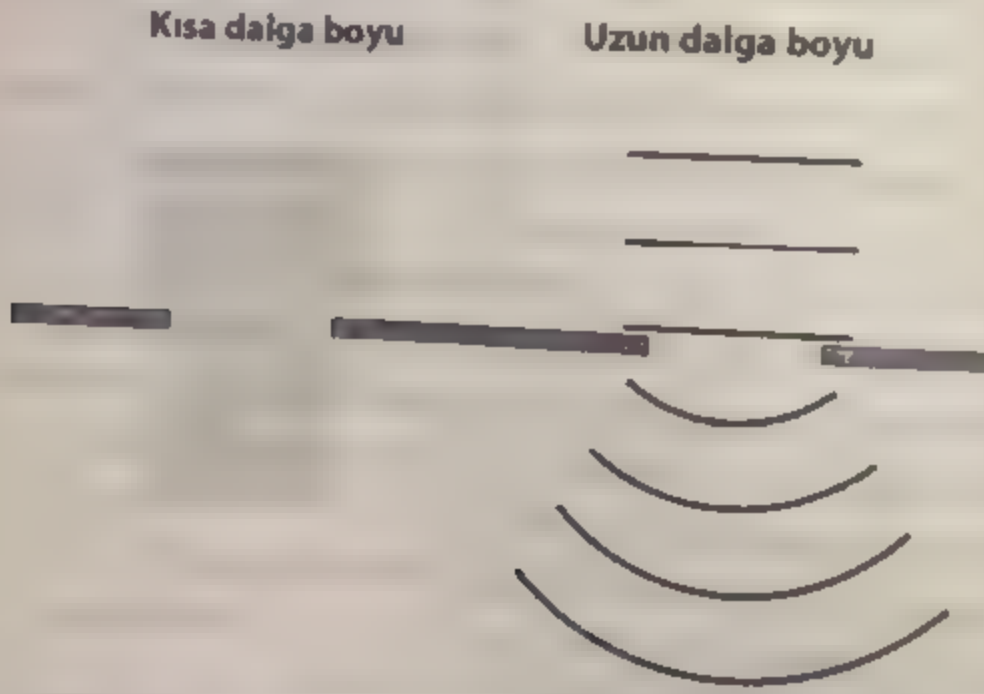
Gündelik hayatta iki tur dalgayla uğraşırız: ışık ve ses. İkisi de dalga fenomeninin örnekleri olsalar da görünüşe bakılırsa çok farklı davranışlar göstermektedirler. Bu farklılıkların sebebi köpeklerin bir ağacın aynı anda iki tarafına birden neden koşmadığını bir parça aydınlatmamızı sağlayacaktır

Ses dalgaları havadaki basınç dalgalarıdır. Bir köpek havladığında ağızındaki havayı dışarı çıkmaya zorlar ve havada bütün yönlerde hareket eden bir titreşim yaratır. Havlama ikinci bir köpeğe ulaştığında, onun kulaklarında titreşimlere neden olur ve bu titreşimler de köpeğin beyininde ses olarak işlem gören sinyallere dönüşür, beyindeki bu işlem ikinci köpeğin de havlamasına neden olur, böylece daha fazla dalga oluşur ve etraftaki insanlar bundan rahatsız olur.

Işık farklı türde bir dalgadır, uzayda yol alan, salınımlı bir elektrik ve manyetik alandır, dış uzayın boşluğunda bile yol alır, uzaktaki yıldızları ve galaksileri görebilmemizin nedeni de budur. Işık dalgaları gözünüzün arka kısmına vurduklarında beyinde sinyallere dönüşüp işlenerek etrafınızdaki dünyanın bir görüntüsünü oluştururlar.

Gündelik hayatta ışık ile ses arasındaki en önemli farklılık, bir engelle karşılaştıklarında neler olduğuyla ilgilidir. Işık dalgaları sadece düz hatlar üzerinde yol alır, ses dalgalarıysa engellenin etrafında bukulüyormuş gibi görünmektedir. Yemek odasındaki bir köpeğin, görmese bile mutfakta bir patates cipsinin yere düştüğünü duymasının sebebi budur

Ses dalgalarının köşeleri donması bir kırılma örneğidir. Bir engelle karşılaşan dalgaların başlıca özelliği budur. Bir dalga açıklığı olan bir engelle örneğin mutfaktan yemek odasına açılan bir kapının bulunduğu bir duvarla karşılaştığında açıklıktan geçen dalgalar dümdüz gitmeye devam etmez, farklı yönlere dağılırlar. Ne kadar çabuk dağıldıkları dalganın dalga boyuna ve içinden geçtikleri açıklığın büyüklüğüne bağlıdır. Açıklık dalga boyundan çok daha büyükse çok az bir bükülme olacaktır, ama açıklığın büyüklüğü dalga boyununkine yakınsa dalgalar olabilecek her yöne tam anlamıyla dağılacaktır.



Solda dalga boyu kısa olan bir dalga, dalga boyundan çok daha büyük bir açıklıkla karşılaşır ve dalgalar az çok düz bir biçimde yollarına devam eder. Sağda, dalga boyu uzun bir dalga dalga boyuna yakın büyüklükte bir açıklıkla karşılaşır, dalgalar çok geniş bir yelpazede ayrılıp çeşitli yönlere dağılır.

Aynı şekilde, ses dalgaları bir sandalve ya da ağaç gibi bir engelle karşılaştıklarında nesnenin dalga boyundan çok büyük olmaması halinde engelin etrafında kırılacaklardır. Havlayan bir



köpeğin sesini boğmak için büyük bir duvara gerek olmasının sebebi budur; ses dalgaları küçük nesnelerin etrafında bukulur ve o nesnelerin arkalarındaki insanlara ya da köpeklere ulaşır

Havadaki ses dalgalarının dalga boyu yaklaşık bir metredir; gündelik nesnelerin, kapıların, pencerelerin, mobilyaların boyuna yakındır. Sonuçta dalgalar büyük ölçüde kırılır, serri köşelerin ardından bile sesleri duyabilmemizin sebebi budur.

Öte yandan ışık dalgalarının çok kısa, bir milimetrenin binde birinden daha kısa bir dalga boyu vardır. Yüz dalga boyu görünür ışık, bir saç telinin enine denktir. Işık dalgaları gündelik nesnelerle karşılaştıklarında pek bukulmezler, bu yüzden de katı nesnelerin karanlık golgeleri olur. Nesnenin tam köşesinde küçük bir kırılma olur, golgelerin kenarlarının hep belli belirsiz olması bu yuzdendir. Ama çoğunlukla ışık düz bir hat üzerinde yol alır; görünür hiçbir kırılma olmaz.

Işığın bir dalga gibi kırıldığını görmediyse bir dalga olduğunu nereden biliyoruz? Işığın gündelik nesnelerin etrafında kırıldığını görmeyiz, çünkü bu nesneler ışığın dalga boyuna kıyasla çok büyüktür. Fakat yeterince küçük bir engele bakarsak ışığın dalga gibi davrandığını yanılgiya yer bırakmaksızın gösteren kanıtlarla karşılaşırız

1799'da Thomas Young adında İngiliz bir fizikçi ışığın dalga niteliğine sahip olduğunu gösteren belirleyici deneyi gerçekleştirdi. Young bir ışık huzmesinin önüne, üzerinde çok dar iki yarık olan bir kart yerleştirdi. Kartın ötesine baktığında iki yarık görüntüsü yerine, birbirine karışmış aydınlık ve karanlık noktalardan oluşan büyük bir oruntu gördü

Young'ın çift yarık denevi, ışık dalgalarının kırılması ve girişimini açıkça gösterir. Yarıkların her birinden geçen ışık çok farklı yönlerle ayrılır ve iki yarıktan geçen dalgalar ortuşur. Herhangi bir noktada, iki yarıktan geçen dalgalar farklı mesafeler almış, farklı sayıda salınımdan geçmiştir. Aydınlık noktalarda iki dal-

ga aynı fazdadır, birbirlerine eklenmişlerdir yarıkların her birinden gelen ışıkla daha parlak bir ışık verirler. Karanlık noktalar, dalgalar zıt fazdadır ve birbirlerini ortadan kaldırmışlardır.



Çift yarık kırılmasının bir tablosu. Solda iki farklı yarıktan gelen dalgalar tam olarak aynı mesafeyi kat eder ve aynı faza girerek parlak bir nokta oluşturur. Ortada, aşağıdaki yarıktan gelen dalga, fazladan bir yarım dalga boyu (renği daha koyu olan çizgi) daha yol kat eder ve yukarıdaki yarıktan gelen dalgayla zıt fazda olur. İki dalga birbirini iptal eder ve örüntüde karanlık bir nokta oluşturur. Sağda, aşağıdaki yarıktan gelen dalga fazladan tam bir dalga boyu daha yol alır ve yukarıdaki yarıktan gelen dalgayla aynı faza girip parlak bir nokta oluşturur.

Young'ın deneyinden önce, ışığın doğası hakkında hararetli bir tartışma yapılıyordu, bazı fizikçiler ışığın dalga olduğunu, Newton da dahil bazılarıysa ışığın küçük parçacıklardan oluşan bir akış olduğunu iddia ediyordu. Fakat girişim ve kırılma sadece dalgalarda olan fenomenlerdir, bu yüzden de Young'ın deneyinin (ve Fransız fizikçi Augustin Fresnel'in yaptığı sonraki deneylerin) ardından herkes ışığın dalga olduğuna ikna oldu. İşler yaklaşık yüzyıl böyle kaldı.



"Bunun ağacın iki tarafına birden geçmekle ne ilgisi var acaba? Ben yarıklardan geçmekle ilgilenmiyorum. Tavşan yakalamak istiyorum."

"Bir ışık huzmesinin yoluna küçük katı engeller koyduğunda da aynı temel süreç işler. Nesnenin sol tarafından geçen ışıkla, sağ tarafından geçen ışığı iki farklı yarıktan geçen dalgalar olarak düşünebilirsin. Hedeflerine farklı yollardan varırlar, bu yüzden de vardıklarında aynı fazda ya da zıt fazda olabilirler. Yarıkları kullandığında olduğu gibi aydınlık ve karanlık noktalardan oluşan bir örüntü görürsün."

"A, tamam, sanırım anladım. Yani tavşanların, kendimle aynı fazda olacağım noktalarda durmasını sağlamam gerek, ha?"

"Hayır, öyle değil, dalga boyu meselesi yuzunden. Birazdan o konuya geleceğim. Ama önce parçacıklardan bahsetmem gerek."

"Peki, sabredebilirim. Çok uzun olmayacaksa tabii."

## Kuantumun Doğuşu: Parçacık Olarak Işık

Işığın dalga modeliyle ilgili ilk soru işareti 1900'de Max Planck adlı Alman bir fizikçiden geldi. Planck, bütün nesnelerin yaydığı termal radyasyon üzerinde çalışıyordu. Sıcak nesnelerin ışık salması çok sıradan bir fenomendir (en bilinen örneği de kızgın bir metal parçasının kızıl ışıltısıdır), bu kadar sıradan bir şeyin kolayca açıklanması gerekirmiş gibi görünüyordu. Fakat 1900'e gelindiğinde, farklı renklerde ne kadar ışık salındığı meselesi (ışığın "tayfı") o zamana dek 19. yüzyılın en iyi fizikçilerinin bileğini bükmuştü.

Planck, tayfin çok özel bir şekli olduğunu, düşük frekanslarda çok fazla, yüksek frekanslarda çok az ışık salındığını, tayfin zirve noktasının, yani salınan ışığın en parlak olduğu frekansın sadece nesnenin sıcaklığına bağlı olduğunu biliyordu. Tayfin şekli-





29

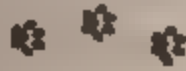
bir Planck osilatörlerin özgül enerji seviyelerine "kuanta" demişti ("Kuant", Latince "ne kadar" anlamına gelen "kuantum" sözcüğünün çoğuludur) Belli bir frekanstaki osilatör bir kuantum (bir hırım enerji,  $hf$ ), iki kuant, üç kuant vb içerebilir; ama asla bir buçuk ya da iki çevrek kuant içeremez. Bu basamakların ismi yerleşmiş, Planck'ın çaresizce başvurduğu numaradan gelişen koskoca bir kuramın adı olmuştur.

Planck sıklıkla, ışık kuantası fikrini icat etmiş olmakla anıl-sa da kendisi ışığın ayrı kuantalar halinde geldiğine hiç inanmadı ve her zaman hırımın, kendisinin geliştirdiği formülü hiçbir nu-maraya başvurmadan türetmenin akıllıca bir yolunu bulabileceğini umdu.

Bir kuantum parçacığı olarak ışıktan ciddi olarak bahseden ilk kış 1905'te Albert Einstein oldu, Einstein bunu fotoelektrik etki-yi açıklamakta kullanmıştı. Fotoelektrik etki de açıklaması basit olmalıymış gibi görünen bir başka fiziksel etkidir: Bir parça meta-lin üzerine ışık tuttuğunuzda, metalden elektron çıkar. Basit ışık sensorlerinin ve hareket detektorlerinin temelini bu oluşturur. Bir sensörün üzerine düşen ışık metalden elektron çıkarır, son-ra bu elektronlar bir devrenin içinden geçer. Sensöre vuran ışık miktarı değiştiğinde, devre bir eylem gerçekleştirir. Orinalik karar dığında ışıkları yakmak gibi ya da sensörün önünden bir köpek geçerken kapıyı açmak gibi.

Işığı, mama torbasını içindkiler mutfağın her tarafına saçılın-caya kadar sallayan bir köpek misali, elektronlar çıkıncaya kadar atomları iletir gen sallayan bir dalga olarak düşünerek fotoelekt-rik etkiyi kolayca açıklayabilmemiz gerekir. Fakat maalesef, bu dalga modelinin tamamen yanlış olduğu görülür: Model, atom-lardan ayrılan elektronların enerjisinin ışığın yoğunluğuna bağlı olması gerektiği tahmininde bulunur. Işık ne kadar parlak olursa sarsma o kadar şiddetli olacak ve parçacıklar o kadar hızlı ucu-sacaktır. Fakat denevlerde elektronların enerjisinin ışığın yoğunlu-

guna bağlı olmadığı görülmüştür. Enerji, yoğunluk yerine da ga modelinin önemli olmaması gerektiğini söylediği frekansa bağı- dır. Düşük frekansta, ne kadar sert sarsarsanız sarsın hiç elektron çıkaramazsınız, yüksek frekanstaysa hafif bir sarsma bile epey enerjisi olan elektronlar elde etmeye yeterlidir.



**"Fizikçiler aptal."**

"Efendim?"

"Yani, bu dediğini her köpek bilir. İçinde mama olan bir torba alırsan hep olabildiğince hırslı sallarsın. Mamayı böyle dışarı çıkarırsın çünkü."

“Eh, peki, öyle olsun, ne diyebilirim ki? Kopekler kuantum fiziğini mükemmel bir sezgiyle kavlıyor ”

"Teşekkürler Biz de sevimliyizdir."

"Tabii, ama fızığın amacı mamanın neden çıktığı gibi çıktığını anlamaktır."

"Siz'e göre öyle olabilir. Köpeklerle göre amaç mamayı almak-  
tır."

Einstein fotoelektrik etkisi Planck'ın formülünü ışığın kendisine uygulayarak açıkladı. Bir ışık huzmesini, bir küçük parçacıklar akışı olarak betimledi, parçacıkların her biri Planck sabitinin ışık frekansıya çarpımına eşit bir enerjiye sahiptir (aynı kural Planck "osilatörleri" için de geçerlidir). Her fotonun (arab. bu ışık parçacıklarına verilen ad) sağlayabileceği enerji miktarı, frekansa bağlı olarak sabittir, bir elektronu yerinden oynatmak için asgari bir miktar enerjiye gerek vardır. Tek bir fotonun enerjisi gerekli asgari miktardan fazlaysa elektron yerinden oynayacak ve fotonun geri kalan enerjisini yüklenecektir. Frekans ne kadar yüksek olursa tek bir fotonun enerjisi o kadar yüksek olacaktır, elektronlar ayrılırken o kadar fazla enerjiye sahip olacaklardır. Tek bir fotonun enerjisi, bir elektronu çıkarmak için gereken



enerjiden düşükse, hiçbir şey olmaz, bu da düşük frekanslarda neden elektron çıkmadığını açıklar.<sup>2</sup>

Işığı bir parçacık olarak tanımlamak 1905'te son derece tartışmalı bir fikirdi, çünkü yüzyıllık bir fizikçi alt ust ediyor, ışığın çok farklı bir biçimde görülmesini gerektiriyordu. Işığın, bir kopeğin tabağına dokülen su gibi sürekli bir dalga olmaktan ziyade, bir tabağa dokülen köpek maması gibi ayrı ayrı parçacıkların akışı olarak düşünülmesi gerekiyordu. Gelgelelim bu parçacıkların yine her birinin kendisiyle ilişkili bir frekansı vardır, bu frekanslar bir şekilde eklenerek tıpkı bir dalga gibi bir girişim örüntüsü oluşturur.

1905'te başka fizikçiler bu fikri derinden sorunlu buldular; Einstein'ın modelinin kabul görmesi zaman aldı. Amerikalı fizikçi Robert Milikan Einstein'ın fikrinden hiç hazzetmiyordu; 1916'da Einstein'ı haksız çıkarma umuduyla, son derece kesin sonuçlar veren bir dizi fotoelektrik etki deneyi gerçekleştirdi.<sup>3</sup> Aslına bakarsanız, Milikan'ın verdiği sonuçlar Einstein'ın öngörülerini doğruladı; ama bu bile foton fikrinin kabul edilmesi için yeterli olmadı. Foton tablosunun kabul edilmesi ancak 1923'te, Arthur Holly Compton'ın X ışınlarıyla yaptığı bir dizi unlu deneyle, ışığın parçacık benzeri davrandığını yanılgiya yer bırakmayacak şekilde göstermesiyle mümkün oldu: Compton, fotonların momentuma sahip olduğunu, bu momentumun çarpışmayla diğer parçacıklara aktarıldığını gösterdi.

2- Düşük enerjili iki fotonu bir araya getirerek bir elektronu serbest bırakmaya yeterli enerjiyi neden sağlayamadığımızı merak edebilirsiniz. Bunun için, iki fotonun aynı anda aynı elektrona çarpması gerekir ve bu neredeyse hiç olmaz.

3- Milikan Einstein'ın modelinin "tatmin edici bir teorik temelden" yoksun olduğunu düşünüyor. Bu modelin başarısını fizik standartlarına göre çok çirkin anlamına gelen "kanksız derecede ampirik" sözüyle niteliyordu. Ironiktir, bu söz, kuramın öngörülerini sağlam bir biçimde doğruladığı makalenin ilk paragrafında geçiyordu.

Tek bir fotonun enerjisi için Planck formülünü alır, sonra bunu Einstein'ın özel görelilik denklemleriyle birleştirirseniz tek bir ışık fotonunun küçük bir miktar momentumu olduğunu bulursunuz. Şu formül kullanılır

$$p = h / \lambda$$

Momentumun sembolü  $p$  dir,  $\lambda$  ise ışığın dalga boyunu gösterir



Bu kitapta hiç görelilik yok dedin sanıyordum "

"Ben kitap görelilik hakkında değil dedim. İkisi aynı şey değil. Göreliliğin bazı fikirleri kuantum fizikliği açısından da önemlidir "

"İyi de göreliliğin bununla ne ilgisi var?"

"Hmm. Görelilik der ki bir fotonun enerjisi olduğu için, hiç kütlesi olmasa bile bir momentumu olması gerekir "

"Yani şu  $E = mc^2$  meselesi mi?"

"Tam olarak değil ama benziyor. Nasıl nesnelerin kütleleri olduğu için enerjileri varsa aynı şekilde fotonların da enerjileri olduğu için momentumları vardır. Hem aferin sana, sözlerinin arasına denklemler sıkıştırabiliyorsun "

"Aman rica ederim. Avaktakımı kopekleri bile  $E = mc^2$  'yı bilir. Ben istisnai bir kopeğim "

Dalga boyu kısa olan bir fotonun momentumu büyüktür, dalga boyu uzun bir fotonun momentumu ise küçüktür. Bu da ışık fotonuyla duran bir nesne arasındaki etkileşimin iki parçasıdır. Enerji ve momentum kazanır, hareket eden fotonsa enerji ve momentum kaybeder. Bunu fark etmeyiz, çünkü söz konusu momentum çok küçüktür. Planck sabiti çok küçük bir rakamdır, ama elektronlar gibi kütleleri çok küçük olan nesnelere ya da

dalga boyları çok kısa olan (dolayısıyla momentumları nispeten yüksek olan) fotonlara baktığımızda momentumdaki değişikliği tespit edebilirsiniz

1923'de Compton başlangıçta dalga boyu 0,0709 nanometre\* olan X ışınlarını katı bir hedefe çarptırdı. (X ışını dalga boyu istisnai derecede kısa ışıktır, görünür ışığın dalga boyu 500 nanometredir) Compton hedeften saçılan X ışınlarına baktığında bunların dalga boylarının daha uzun olduğunu gördü, bu durum ışınların momentum kaybettiğini gösteriyordu. (Örneğin ilk hedeflerine çarpıp 90 derece açıyla sıçrayan X ışınlarının 0,0733 nanometrelik bir dalga boyu vardı) Işık parçacıksa olması gereken şey tam da böyle bir momentum kaybıdır. Bir X ışını fotonu gelir de hedefteki az çok durağan elektrona çarparsa momentumun bir kısmını elektrona geçirir ve elektron hareket etmeye başlar. Çarpışma sonrasında fotonun momentumu daha az olacaktır; böylece dalga boyu tam da Compton'un gözlediği üzere daha uzun olacaktır.

Kaybedilen momentum miktarı, fotonun çarpıp sıçradığı açıya da bağlıdır, bir elektronu sıyrıp geçen bir foton fazla momentum kaybetmez; elektrona çarpıp geri donense epeyce momentum kaybeder. Compton dalga boyunu birçok farklı açıdan ölçmüş; vardığı sonuçlar, kuramsal tahminlere tam bir uygunluk göstermiş, bu değişikliğin başka bir etkiden değil, elektronlarla çarpışmaktan kaynaklandığını doğrulamıştır.

Einstein, Millikan ve Compton ışığın parçacık niteliğini gösterdikleri için Nobel ödülü kazanmışlardır. Bir arada ele alındığında Millikan'ın fotoelektrik efekti deneyleri ile Compton'un çarpırma deneyleri, çoğu fizikçinin ışığın bir parçacık akımın-

\* 1 nanometre  $10^{-9}$  metredir yani bir metrenin bir milyarda biridir (0,000000001)



dan oluştugu fikrini kabul etmesi için yeterli olmuştur 3

Bir parçacık olarak ışık fikri ne kadar tuhaf olursa olsun, bundan sonra gelen şey daha da tuhaftı.

## Karışan Elektronlar: Dalga Olarak Parçacıklar

Yine 1923'te, Louis Victor Pierre Raymond de Broglie<sup>6</sup> adında Fransız bir doktora öğrencisi radikal bir öneride bulundu. Işık ile madde arasında bir simetri olması gerektiğini, bu yüzden de elektron gibi bir madde parçacığının bir dalga boyu olması gerektiğini savunuyordu. Nihayetinde ışık dalgaları parçacık gibi davranıyorsa, parçacıkların da dalga gibi davranması gerekmiyordu mu?

De Broglie tıpkı bir fotonun, dalga boyuyla belirlenen bir momentumu olduğu gibi, elektron gibi maddi bir nesnenin de momentumuyla belirlenen bir dalga boyu olması gerektiğini ileri sürüyordu:

$$\lambda = h/p$$

5- Birkaç tutucu fizikçi, foton fikrine direnmıştır, çünkü Compton etkisi, çok karmaşık olsa da fotonlar olmadan bile açıklanabilir. Son direniş, 1977'de, Kimble, Dagenais ve Mandel'in yaptığı, tek tek atomların saldıgı ışığın incelendiği bir deneyle fotonların varlığına dair değiştirilemeyecek bir kanıt sunulduğunda çökmüştür. Einstein'ın önerisi ile bu önerinin nihayet kabul edilmesi arasında geçen yetmiş iki yıl, fizikçilerin yeni bir fikirle karşılaştıklarında gösterdikleri inatçılığa dair bir şeyler anlatmaktadır. Bir fizikçiyi sevilen bir modelden ayırmak, bir köpeği iyice çığnenmiş bir kemikten ayırmak kadar zor olabilir.

6- Louis de Broglie'un sovadının doğru telaffuzu (ısım bolluğu aristokrat geçmişini yansıtır, kendisi 7. Duk de Broglie'dur) Amerikalı fizikçiler arasında büyük bir kargaşa kaynağıdır. "De BRO-ly" "de-BRO-gly" ve "de-BROY-ly" dendiğini duydum. Doğru Fransızca telaffuzsa "de BROY" a yakındır. yalnız sesli harfi hafif gargara yapıyormuş gibi çıkarmak için Fransız olmanız gerekir.

Bir fotonun momentumunu veren formülün, fotonun dalga boyunu vermesi için tersine çevrilmesiyle oluşturulmuş bir formuldur bu. Bu fikrin matematiksel bir zarafeti vardı; 1923'te bile kuramsal fizikçiler için çekiciydi; ama tam bir saçmalık olarak görünüyordu, katı nesneler dalga gibi davranma işareti göstermez. De Broglie doktora tezinin bir parçası olarak bu fikri sunduğunda, kimse bununla ne yapılacağını bilemedi. Profesörleri ona bir derece verip vermeyeceklerine bile emin değillerdi, tezini Einstein'a gösterme çaresine başvurdular. Einstein tezin çok parlak olduğunu söyledi ve de Broglie derecesini aldı; ama dalga olarak elektron fikri, elektronların dalga olarak davrandığı 1920'lerin sonunda yapılan iki deneyle değiştirilemez biçimde kanıtlanıncaya dek pek destek görmedi.

1927'de Amerikalı iki fizikçi Clinton Davisson ile Lester Germer, nikel bir yüzeye elektron çarpıp kaç elektronun farklı açılarla sıçradığını kaydediyorlardı. Detektörleri belli bir açıda sıçrayan elektron sayısının çok fazla olduğunu gösterdiğinde şaşırdılar. Bu gizemli sonuç, elektronların dalga benzeri kırılmalarının, hedefleri olan nikel malzemede farklı atom sıralarına çarpmalarından ileri geldiği söylenerek açıklandı. Elektron huzmesi nikel içinde bir miktar yol alıyordu; huzmenin bir parçası nikel kristalinde<sup>7</sup> ilk sıradaki atomlara çarpıyordu, diğer parçalarıysa ikinci, üçüncü, dördüncü vs. sıralara çarpıyordu. Bu farklı atom sıralarından yansıyan elektronlar dalga gibi davranıyordu. Kristalin derinlerindeki atomlara çarpan dalgalar, yüzeyin yakınındaki atom sıralarına çarpan dalgalardan daha fazla yol alıyordu. Bu dalgalar, Young'ın deneyinde farklı yarıklardan (gerçi sadece iki değil, birçok yarık vardı) geçen ışık dalgaları gibi birbirine karı-

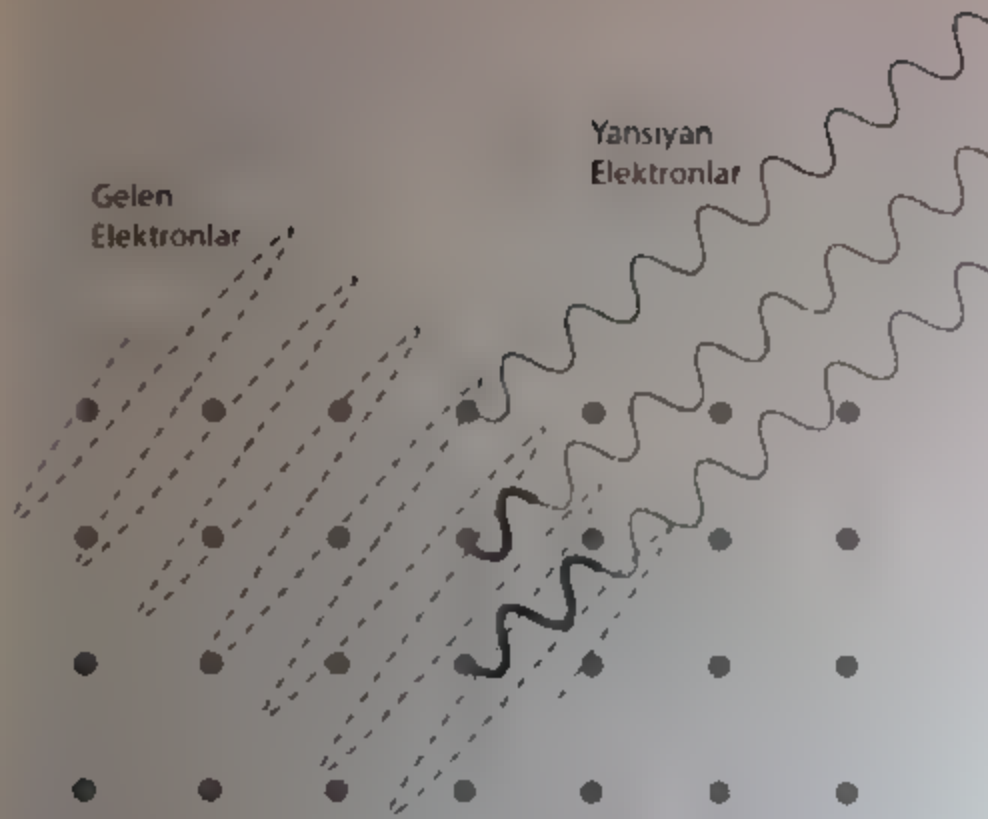
7- Kristal, bir fizikçiye, içindeki atomların düzenli bir sıralamayla bulunduğu bir katıyı ifade eder. Bu ifade, normalde bu kelimeyle ilişkilendirdiğimiz berrak ve ışıltılı şeyleri, aynı zamanda birçok metal ve başka maddeyi de içerir.

şıyordu. Çoğu kez yansıyan dalgalar zıt fazda oluyor ve birbirini iptal ediyordu. Ama bazı açılarda, alınan fazladan yol dalgalarının aynı fazda olup parlak bir nokta oluşturmalarına yetecek kadar uzunlukta oluyordu. Davisson ve Germer bu parlak noktaları o açıdan yansıyan elektron sayısında büyük bir artış olarak tespit etmişlerdi. De Broglie'un, elektrona bir dalga boyu vermesiyle ilgili formülü, Davisson ve Germer'in vardığı sonucu mukemmel düzeyde tahmin eder.<sup>8</sup>

---

8- Ironiktir Davisson ve Germer, aygıtlarının bir parçasını kırdıkları için başarılı olmuşlardı. Yapıtları ilk deneylerde bir kırılma görmemişlerdi çünkü hedefteki nikel malzeme her biri farklı bir girişim örüntüsü üreten birçok küçük kristalden oluşuyordu. farklı örüntülerden çıkan farklı parlak noktalar da birlikte akıyordu. Sonra kazara vakum sistemlerine hava aldılar. Hasarı onatırken hedefi erittiler. tek bir büyük kristal haline gelen nikel hedef tek bir berrak kırılma örüntüsü oluşturdu. Bazen bir fizikçinin başına gelebilecek en büyük şans. önemli bir şeyi kırmasıdır.





Elektronların bir nikel kristaline çarpıp kırılmaları. Gelen bir elektron huzmesi (kesintili çizgi), düzgün bir atom kristalinin içine girer ve kristaldeki farklı atomlardan dalga parçacıkları (tek tek elektronlar) yansır. Kristalin derinlerinden yansıyan elektronlar dışarı çıkarken daha uzun bir mesafe alırlar (kıyı çizgiler), ama bazı açılardan bu mesafe tam bir dalga boyunun toplamıdır ve kristalden ayrılan dalgalar aynı fazda olup Davısson ile Germer'in gördüğü parlak noktayı oluşturur.



"Bir dakika, bir dakika, nasıl oluyor bu? Bir sürü yarık olursa bir sürü parlak nokta olması gerekmez mi?"

"Pek sayılmaz. Dalgaları birbirine eklersen yine parlak ve karanlık noktalardan bir oruntu oluşur, ama daha fazla yarık kullanırsan parlak noktalar daha parlaklaşıp daralır, karanlık noktalar da kararıp genişler."

"Yani, çitleri aşip komşunun bahçesine geçersen obür tarafı daha parlak ve daralmış mı olurum?"

"Tamam, daha daralırsın, ama bu pek parlak bir fikir olmaz Burada asıl mesele Davisson ile Germer'in kullandığı yarıkların birbirine çok yakın olması; yarıklar birbirine o kadar yakındı ki detektorlerini nereye koysalar sadece tek bir parlak nokta görüyorlardı Farklı bir kristal ya da daha hızlı hareket eden elektronlar söz konusu olsaydı daha fazla nokta görebilirlerdi "

Aynı tarihlerde Aberdeen Üniversitesi'nde George Paget Thomson da gerçekleştirdiği bir dizi deneyde elektron huzmelerini ince metal tabakaların üzerine gönderiyor, bu elektronların oluşturduğu kırılma örüntülerini gözlemliyordu (Bu gibi örüntüler esasen, Davisson-Germer deneyindeki örüntüyle aynı şekilde oluşur ) Davisson Germer ve Thomson'ın gözlemlediği kırılma örüntüleri, Thomas Young'ın 1799'da gösterdiği gibi, dalga davranışının yanığıya yer bırakmayan bir imzasıydı; dolayısıyla bu deneyler de Broglie'un haklı olduğunu, elektronların dalga niteliğine sahip olduğunu kanıtlıyordu. De Broglie ongorusundan dolayı 1929'da Nobel Fizik Ödülü'nu aldı, Davisson ile Germer de elektronun dalga niteliğini gösterdikleri için 1937 Nobel Ödülü'nü paylaştılar.<sup>9</sup>

Davisson, Germer ve Thomson'ın deneylerinin ardından bilim insanları, bütün atomaltı parçacıkların dalga gibi davrandıklarını gösterdi Proton ve nötron huzmeleri upkı elektronların yaptığı gibi atom numunelerine çarpıp kırılacaktı Aslına bakarsanız nötron kırılması artık atomik düzeyde maddelerin yapılarının belirlenmesinde kullanılan standart araçtır: Bilim insanları atomların nasıl düzenlendiğini, atom numunelerine çarpıp kırılan nör-

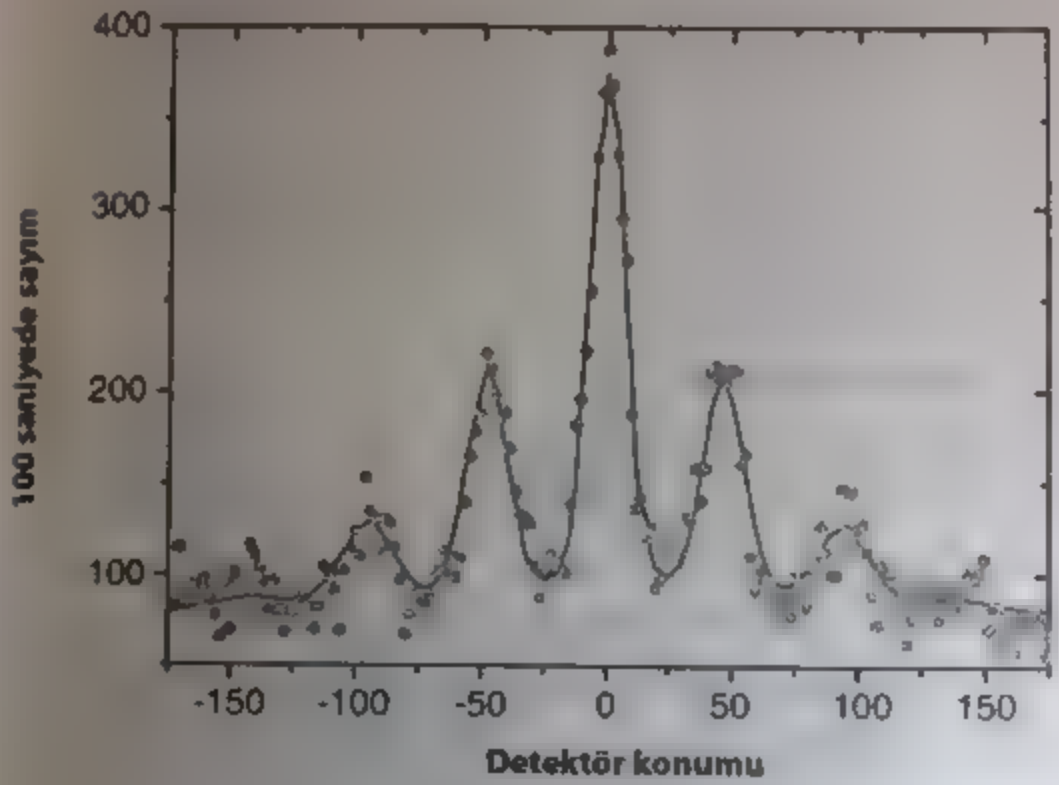
9. Büyük Nobel dedikodularından biri de Thomson'ın Cambridge'e görevli bahası J. J. Thomson'ın elektronun parçacık niteliğini gösterdiği için 1906 Nobel Ödülü'nu kazanmış olmasıdır Herhalde bu durum Thomsonlar'ın sofrasında ilginç sohbetlere konu olmuştur







moleküller ıpkı ışık dalgaları gibi yayılıp birbirine karışıyor



Bir dizi dar yarıktan geçen bir molekül huzmesinin yarattığı girişim örüntüsü. Ortadaki zirve noktanın her iki tarafındaki fazladan kumeler yarıklardan geçen moleküllerin çarpıp kırılmasının ve girişmesinin sonucudur (O Nairz, M Arndt, A Zeilinger'in izniyle yeniden basılmıştır American Journal of Physics, 71, 319 [2003] Copyright 2003, American Association of Physics Teachers)

Zeilinger grubu sonraki deneylerinde, daha da büyük moleküllerin çarpıp kırılma örüntüsünü inceledi, baştaki 60 karbon atomlu moleküle 48 florin atomu daha eklendi. Bu moleküllerin kütlesi bir elektronun kütlesinin yaklaşık üç milyon katıdır ve dalga nınelığı doğrudan gözlenen en kütleli nesneler şimdilik bunlardır.

Bir parçacığın kütlesi arttıkça dalga boyu kısalmır dalga etkile

rını doğrudan görmek de daha zorlaşır Şimdiye kadar hiç kimse nin bir kopeğin bir ağacın etrafında kırıldığını görmemiş olmasının sebebi budur, böyle bir şeyi yakın bir zamanda görmemizde mümkün değil Gerçi fizik açısından ele alındığında, bir köpek, Zeilinger grubunun dalga özelliklerini gösterdiği bir biyolojik moleküller topluluğundan başka bir şey değildir Bu yüzden başka her şeyin olduğu gibi, bir köpeğin de dalga niteliği olduğunu kendimizden emin olarak söyleyebiliriz

"Peki, *aslında* bunlar ne?"

"Ne demek istiyorsun?"

"Yani elektronlar *aslında* dalga gibi davranan parçacıklar mı yoksa fotonlar *aslında* parçacık gibi davranan dalgalar mı?"

"Yanlış sorular soruyorsun. Daha doğrusu yanlış cevaplar veriyorsun. Doğru cevap Uç Numaralı Kapi' olacak. Elektronlar da fotonlar da ne sadece dalga ne sadece parçacık olan, aynı anda biraz dalga özellikleri biraz parçacık özellikleri gösteren üçüncü tür bir nesnenin örnekleridir "

"Yani sinşan gibi?"

"Ne gibi, ne gibi?"

"Biraz sincap, biraz tavşan olan bir yaratık gibi Sinşan "

"Ben 'kuantum parçacığı' demeyi tercih ediyorum, ama sanırım asıl fikir bu Evrendeki her şey bu kuantum parçacıklarından oluşur "

"Bu çok tuhaf."

"Ah bu tuhaflıkların sadece başlangıcı canım "

## II

### Kemiğim nerede benim? Heisenberg Belirsizlik İlkesi



Emmy odaya geldiğinde kanepede oturmuş gazetelere göz gezdiriyordum, endişeli görünüyordu "Ne var, ne oldu?" diye sordum.

"Kemiğimi bulamıyorum," dedi. "Nerede biliyor musun?"

"Nerede olduğuna dair bir fikrim yok," dedim "Ama hangi hızla yol aldığını kesinlikle söyleyebilirim "

Bu cevap üzerine bir sessizlik oldu, kafamı kaldırıp baktığımda mel mel bana baktığını gördüm.

"Bu bir fizik esprisi," diye açıkladım, böyle bir açıklama işlere her zaman bir komiklik katar. "Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, bilirsın? Bir nesnenin konumundaki belirsizliğin, momentumundaki belirsizlikle çarpımı Planck sabitinin dört pi ye holumunden büyüktür ya? Bu da bir belirsizlik küçük olduğunda, diğerinin çok büyük olması gerektiği anlamına gelir hanı?"

Şimdi artık dosdoğru yuzume bakıyor, neredeyse hırhıyordu "Kes şunu!"

"Neden? Tamam, o kadar komik değil, ama o kadar berbat da değil."



"Kemigimi bulamamam senin hatan "

"Neden benim hatam oluyormuş?"

"Gıdıp ne kadar hızlı hareket ettiğini ölçtün ve konumu belirsizleştirdi. Şimdi de nerede bulamıyorum "

"Hayır, öyle olmadı," dedim " Belirsizlik ilkesi öyle işlemez "

"Evet, böyle işler. Şimdi söyledin işte. Kemigimin ne kadar hızlı gittiğini biliyorsun ve ben de şimdi onu bulamıyorum "

"Öncelikle o bir şakaydı. Kemiginin yonlu hızını gerçekten ölçmedim. İkincisi bu belirsizlik ilkesine biraz hatalı bir bakış mesele. Ölçümün sistemin durumunu değiştirmesi değil, mesele ölçebilmemizin, biz konum ve momentumu ölçene kadar onların belirsiz olmasıyla sınırlı olması."

Kafası karışmış görünüyordu. "Ben arada bir fark görmüyordum."

Bak şimdi. Her şeyi ölçümün etkisine bağladığın tabloda, her neyi ölçüyorsan onun bazı kesin ve iyi tanımlanmış özellikleri olduğunu, bu değerlerde belirsizliğin ancak onların ölçümüyle oluşan sapmalardan kaynaklandığını örtülü olarak varsaymış olursun. Ama olan bu değildir, kuantum kuramında bu niceliklerin kesin değerleri yoktur. Kesin olmamalarının sebebi, senin ölçümündeki sınırlamalar değildir, tanımlanmadıkları için kesin denamazlar ve gerçekliğin kuantum niteliğinden dolayı da tanımlanamazlar "

"Haa!" Bir an düşünceli göründü, sonra yüzüne bakmaya devam etti. "Sanırım kemigimi kaybettin, kafanı karıştırıp sıyrılmaya çalışıyorsun "

"Hayır, kuram aslında böyle işlemez. Gerçi bu pek dille getirilmeyen bir nokta, yonlu hızını ölçerek kemiginin konumunu bozmuş olsam bile onu bulmanı engellemek mümkün olmazdı."

"Öyle mi? Nedenmiş o?"

"Çünkü söz konusu belirsizlik çok küçük olurdu. Demek işte."

tediğim kemiğimin birkaç yüz gramlık bir kutlesi vardır, yönlü hızını saniyede bir milimetre olarak ölçmüş olsaydım, bu konumunda yaklaşık 10-31 metrelik bir belirsizlik yaratırdı. Bir protonun boyutunun bir trilyonda biri kadar yanı, bunu asla fark edemezdim."

"Öyle mi? Peki, benim kemiğim nerede akıllı çocuk?"

"Bilmiyorum. TV dolabının altına baktın mı? Bazen oraya tepilmiş oluyor da."

TV'ye doğru seyrilip burnunu dolabın altına soktu. "Ahh! İşte kemiğim!" Bir süre kemiğe pençe attı, nihayetinde dolabın altından çıkarmayı başardı. "Bir kemiğim var!" Gururla bağırıp gurultuyla çığnemeye başladı, belirsizlik ilkesini de unutup gitti.

Heisenberg'in belirsizlik ilkesi Einstein'ın  $E = mc^2$ 'sinden (görelilikten ileri gelen en meşhur sonuçtan) sonra muhtemelen modern fizikğin en bilinen sonucudur. Çoğu insan rastlasa bir dalga fonksiyonunu tanımaz; ama hemen herkes belirsizlik ilkesini duymuştur. Bir nesnenin konumunu ve momentumunu aynı anda bilmek imkânsızdır. Konumu daha iyi ölçerseniz momentum hakkında mutlaka bilgi kaybına uğrarsınız, aynı şey tersi için de geçerlidir.

Bu bölümde, belirsizlik ilkesinin tartışmış olduğumuz parçacık-dalga ikileminden nasıl doğduğunu tanımlayacağız. Belirsizlik ilkesi genellikle, bir sistemin ölçülmesinin sistemi değiştirmesi olarak sunulur; bu biçimiyle kuantum belirsizliğine vaptan göndermeler, siyasetten tutun pop kulture hatta spora varıncaya kadar her yerde karşımıza çıkar.<sup>1</sup> Gelgelelim belirsizlik ilke-

1- Bu meseleyle ilgili olarak karşımıza çıkan konuların genişliğine dair bir fikir vermek için şunu anlatayım. Haziran 2008'de Google başka verilerin yanı sıra Vermont Free Press'te yayınlanan trafik kameralarıyla ilgili bir haberde Toronto Star'da yayınlanan, YouTube'un underground sanatçılar üzerindeki etkileriyle ilgili bir makalede, NBA'de oynayan Phoenix Suns takımı hakkındaki bir blog makalesinde Heisenberg belirsizlik ilkesinden bahsedildiğini ortaya koydu. Bu bölümün sonuna geldiğimizde belirsizlik ilkesini buralar-

10  
sının, ölçümün ayrıntılarıyla pek ilgisi yoktur. Kuantum belirsizliği bilebileceklerinizle ilgili temel bir sınırdır, kuantum nesnelerinin hem dalga hem parçacık özellikleri göstermeleri gerçeğinden doğar.

Belirsizlik ayrıca kuantum fizığının felsefeyle çarpıştığı ilk yerdir. Ölçümün temel sınırları olması fikri, klasik fizığın hedefleri ve temelleriyle doğrudan çatışır. Kuantum belirsizliğiyle uğraşmak, fizığın temellerinin tamamen yeniden düşünülmesini gerektirir; doğrudan ölçüm ve ölçüm sonuçlarının yorumlanmasıyla ilgili üçüncü ve dördüncü bölümlerde sunacağımız meselelere çıkar.

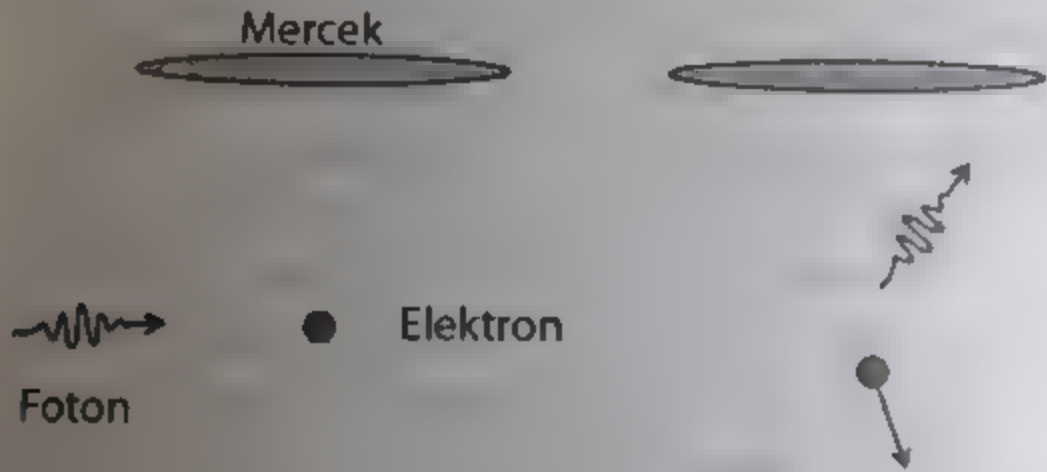
### Heisenberg'in Mikroskopu: Yarı Klasik Argümanlar

Belirsizlik ilkesinin, gelenek halini almış bir biçimde, ölçüm eyleminin sistemin halini değiştirmesi olarak tanımlanması, esasen klasik fiziğe dayanır ve klasik eğitim almış fizikçileri, kuantum belirsizliğinin ciddiye alınması gerektiğine ikna etmek için 1920'lerde, 30'larda geliştirilmiştir. Bu, fizikçilerin yarı klasik argüman dediği şeydir. Kullanılan fizik klasiktir, üzerine birkaç modern fikir eklenmiştir. Tablonun tamamı değildir; ama kolayca anlaşılabilir olmak gibi bir avantajı vardır.

Belirsizliğin yarı klasik ele alınmasının ardındaki fikir, kopeklerin aşına olduğu bir fıkırdır. Düşünün. Bahçede, konumunu ve yönlü hızını çok iyi bilmek istediğiniz bir tavşan var. Konumunu daha iyi belirlemeye kalktığınızda (yanına yaklaştığınızda), kaçınılmaz olarak kaçmasına sebep olup yönlü hızını değiştiriyorsunuz. Yanına ne kadar yavaş, surunurcesine yaklaşırsanız yaklaşın er geç uzaklaşıyor, siz de tavşanın konumunu ve yönlü hızını da bahsedildiğinden çok daha iyi anlamış olacağınızı umuyorum.

gerçekten doğru dürüst öğrenemiyorsunuz.

Elektronlar tavşanlar gibi duyarlı varlıklar değildir, bu yüzden kendi başlarına koşmazlar, ama benzer bir süreç yaşanır. Bir elektronun konumunu ölçebilmek için onu görünür kılacak bir şey yapmanız gerekir; elektrona bir ışık fotonu çarpıtıp ayrılan ışığı mikroskopla gözlemek gibi. Gelgelelim birinci bölümde gördüğümüz üzere fotonun momentumu vardır; elektrona çarpıtığında da onun momentumunu değiştirir. Çarpışma sonrası elektronun momentumu kesin değildir, çünkü mikroskop merceği bazı açılardan sıçrayan fotonları toplar; bu yüzden elektronun tam olarak nereye gittiğini söyleyemezsiniz.



Gelen bir foton, duran bir elektrona çarpar ve elektronun konumunu ölçmek için bir mikroskop merceği tarafından toplanır. Fakat çarpışma sırasında elektron bir momentum kazanır, bu da momentumunda belirsizliğe yol açar.

Işığın dalga boyunu artırarak (fotonun elektrona verebileceği momentumu azaltarak) elektronun momentumunda daha küçük bir değişiklik yaratabilirsiniz, fakat dalga boyunu artırırsanız mikroskopunuzun çözünürlüğünü azaltmış olursunuz ve ko-



num hakkında bilgi kaybına uğrarsınız.<sup>2</sup> Konumu iy. bilinen, terseniz dalga boyu kısa, momentumu çok fazla olan ışık k... manuz gerekir, böyle bir ışık huzmesi elektronun momentumu da büyük bir değişiklik yaratacaktır. Momentum hakkında... kaybına uğramaksızın elektronun konumunu kesin olarak... edemezsiniz, aynı şey tersi için de geçerlidir.

Ne var ki belirsizlik ilkesinin asıl anlamı bundan da... Yukarıdaki mikroskopluk düşünce deneyiminin gösterdiği üzere... ölçmeye çalışmadan önce elektronun belli bir konumu ve be... bir yönlü hızı vardır, ölçümden sonra da belli bir konumu ve be... li bir yönlü hızı olacaktır. Konumun ve yönlü hızın ne oldu... nu bilemezsiniz, ama kesin değerleri vardır. Fakat kuantum ka... ramında bu değerler tanımlı, belirli değildir. Belirsizlik ölçümler... sınırlarıyla ilgili bir ifade değildir, gerçekliğin sınırlarıyla ilgili bir ifadedir. Bu parçacığın kesin konumu ve momentumunu isteme... nin bir anlamı bile yoktur, çünkü bu nicelikler yoktur.

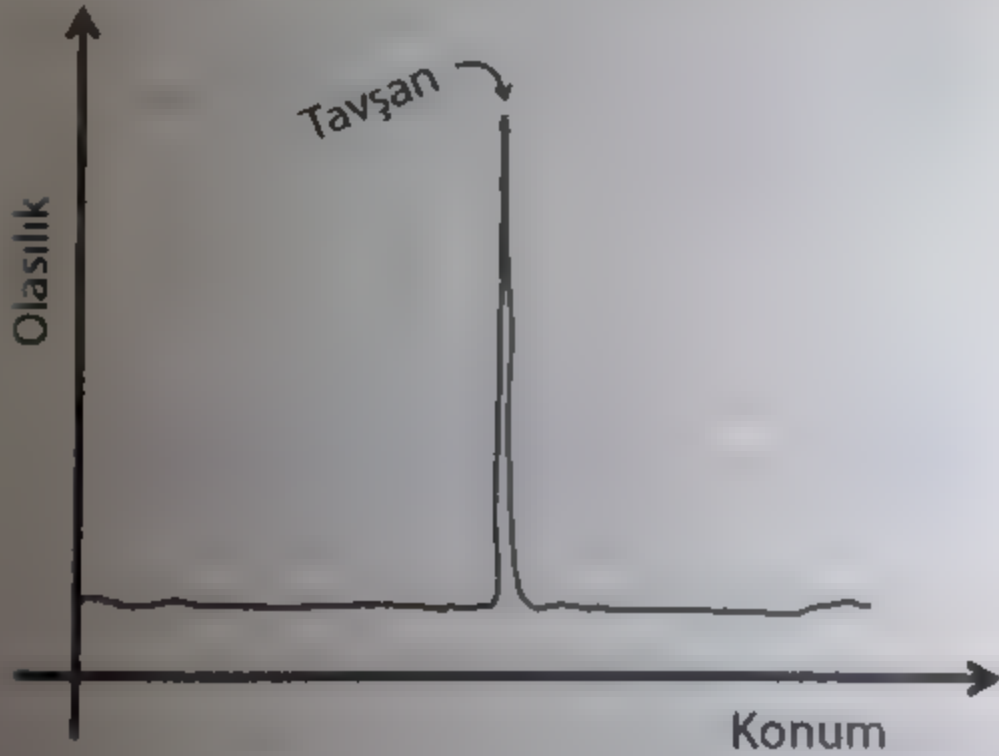
Bu temel belirsizlik, kuantum parçacıklarının ikili niteliklen... nin bir sonucudur. Önceki bölümde gördüğümüz gibi, deneyler ışık ile maddenin hem parçacık benzeri hem dalga benzeri özel... likleri olduğunu göstermiştir. Kuantum parçacıklarını matem... tıksal olarak tanımlarsak, ki fizik de zaten gerçekliğin matematik... sel olarak tanımlanmasıyla ilgilidir, bu nesnelerden onların aynı anda hem parçacık hem dalga özelliklerine sahip olmasını mum... kun kılan bir tarzda bahsetmenin bir yolunu bulmamız gereki... yor. Tek yolun, kuantum parçacıklarının hem konumlarının hem momentumlarının belirsiz olmasından geçtiğini göreceğiz.

2. Bilim insanlarının çok küçük şeylere bakmak için elektron mikroskobu kullanmasının sebebi budur. Elektron mikroskopları görünür ışık yerine elektron kullanır, elektronların dalga boyları görünür ışıktan daha küçüktür.

## Bir Kuantum Parçacığı Yapmak: Olasılık Dalgaları

Parçacıkları matematiksel olarak betimlemenin, 1920'lerin sonlarından kalan olağan yolu, kuantum dalga fonksiyonlarından geçer. Bir nesnenin dalga fonksiyonu, evrenin her noktasında bir değeri olan matematiksel bir fonksiyondur, bu değerın karesi, bir parçacığı belli bir zamanda belli bir konumda bulma olasılığını verir. Sormamız gereken soru şudur. Hem dalga hem parçacık özelliklerine sahip bir olasılık dağılımını ne tür bir dalga fonksiyonu verir?

Klasik bir parçacık için bir olasılık dağılımı kurmak kolaydır, sonuç şöyle bir şeye benzer

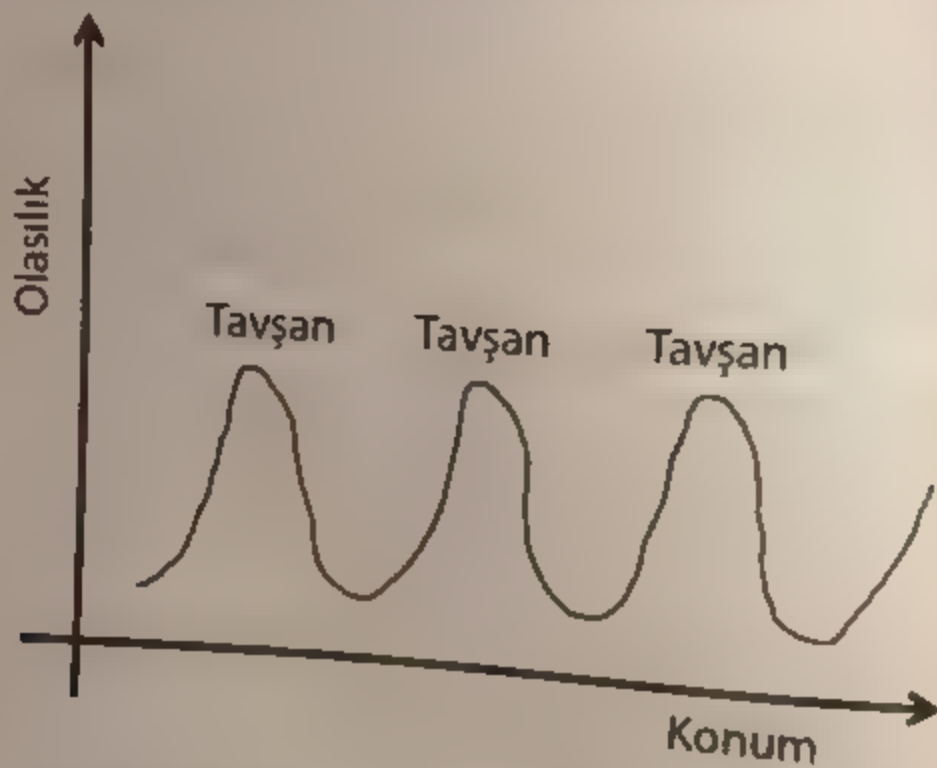


Nesneyi, diyelim ki arka bahçedeki şu sinir bozucu tavşanı bulma olasılığı, nesnenin gayet iyi tanımlanmış konumu dışında her yerde sıfırdır. Bahçeye baktığınızda hiçbir şey görmezsiniz, görmezsiniz, görmezsiniz, TAVŞAN'ı görürsünüz, görmezsiniz.

niz, görmezsiniz, görmezsiniz.

Ama bu dalga fonksiyonu bizim gereksinimlerimizi karşılamaz. İyi tanımlanmış bir konumu vardır, ama bu tek bir sıvrı değildir ve bir sıvrılmanın da dalga boyu yoktur. Unutmayın, dalga boyu tavşanın momentumuna denk düşer; momentum da belirtmeye çalıştığımız niceliklerden biridir, bu yüzden de bir değeri olması gerekir.

Peki, o halde belirgin bir dalga boyu olan bir olasılık dağılımını nasıl çizeriz? Bunu yapmak da kolaydır ve şöyle görünür

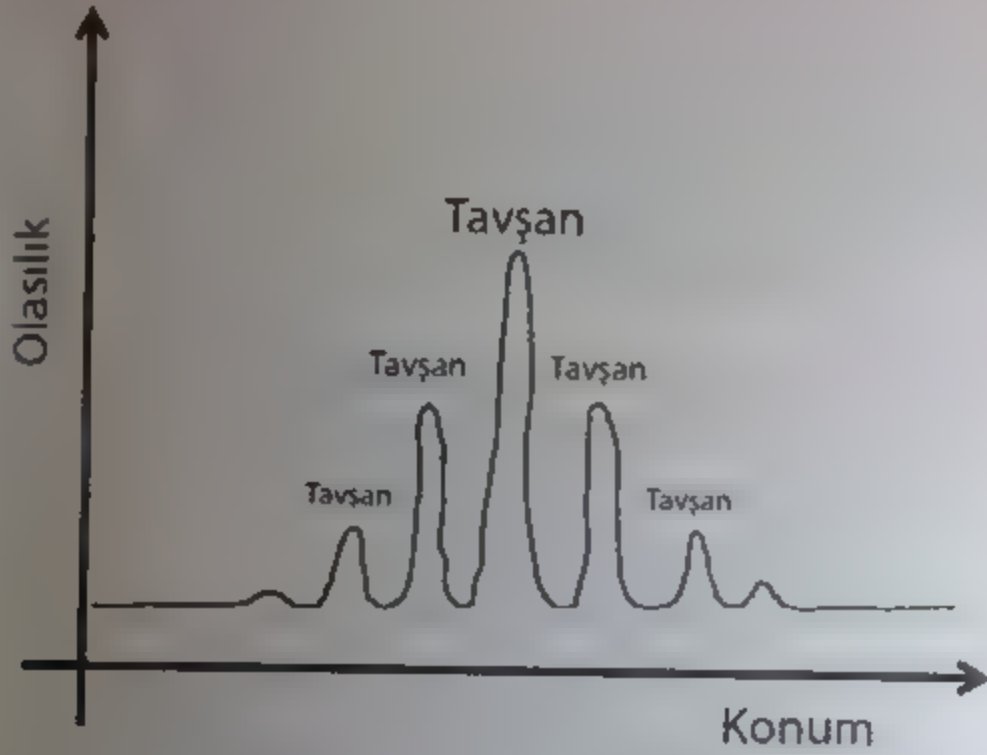


Burada, tavşanı belli bir konumda bulma olasılığı salınır. tavşan, Tavşan, TAVŞAN, Tavşan, tavşan, Tavşan, TAVŞAN, Tavşan, tavşan vs

Ama bu dalga boyu da gereksinimlerimizi karşılamaz. Bu dalga boyunu tanımlamak kolaydır. Olasılığın en büyük olduğu iki nokta arasındaki mesafeyi ölçeriz, böylece elimizde iyi tanımlanmış bir momentum olur, ama tavşan için belli bir konum belirleyemeyiz. Tavşan bahçenin tamamına yayılmıştır, onu bir sürü

yerde bulma olasılığı vardır Tavşan görme olasılığının düşük olduğu yerler vardır; ama bunlar fazla yer tutmaz

İhtiyacımız olan şey bir "dalga paketidir", parçacık ve dalga özelliklerini tek bir olasılık dağılımında birleştiren bir dalga fonksiyonudur; şöyle



Aradığımız şey bu dalga fonksiyonudur: hiçbir şey, hiçbir şey, tavşan, Tavşan, TAVŞAN, Tavşan, tavşan, hiçbir şey, hiçbir şey. Tavşan muhtemelen küçük bir alan içinde bulunacaktır, onu bu alanın dışında bulma olasılığı sıfıra düşer. Bu alan içinde olasılıkta salınmalar görürüz, bu da bir dalga boyunu, dolayısıyla momentumu ölçmemizi mümkün kılar

Bu dalga paketi aradığımız parçacık ve dalga özelliklerine sahiptir. Sonuçta parçacığın hem konumunda hem momentumunda bir belirsizlik de vardır

Konumdaki belirsizlik dalga paketine bakılır bakılmaz hemen belirgindir. Tavşan belli bir konuma sabitlenemez, onu bulma olasılığının gayet yüksek olduğu birkaç yer vardır Tavşan büyük



ihumalle dalga paketinin tam merkezinde bulunacaktır, ama on-  
biraz solda ya da biraz sağda bulma olasılığı da yüksektir. Bu da-  
ga paketivle betimlenen konum mutlaka belirsizdir.

Dalga boyundaki belirsizlik o kadar belirgin değildir, ama da-  
ga boyu kesin değildir, çünkü bu dalga paketi aslında her bir  
farklı momentuma sahip çok sayıda dalganın bileşimidir. Bu da-  
gaların her biri tavşan için belli bir olası momentumu temsil eder  
bu yüzden tavşanın bulunabileceği birkaç farklı konum olduğu-  
gibi momentum için de olası birkaç değer vardır. Dolayısıyla bu  
dalga paketinin betimlediği momentumun bir belirsizliği vardır.

Birçok dalgayı birleştirerek bir dalga paketini nasıl elde ede-  
niz? Önce iki basit dalgayla işe başlayalım, biri bahçede rastgele  
hoplayıp zıplayan bir tavşana ait olsun, dalga boyu daha kısa olan  
diğer dalgaysa aşağıdaki grafik aynı alanda bir dalganın 20. diğ-  
rinin 18 kez salındığını göstermektedir) yakınlarda bir kopek ol-  
duğunu bildiğinden daha hızlı hareket eden bir tavşana ait olsun  
şimdi bu iki dalga fonksiyonunu birbirine ekleyelim.

"Bir dakika, bir dakika... Şimdi iki tavşan mı oldu?"

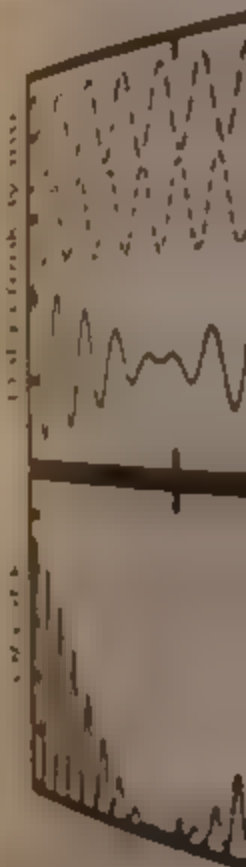
"Hayır, her dalga fonksiyonu belli bir momentumu olan bir  
tavşanı betimliyor, ama her iki seferde de aynı tavşanı

"Ama bunları birbirine eklemek iki tavşan olduğu anlamına  
gelmiyor mu?"

"Hayır, hayır" bu durumda, tek bir tavşanı bulabileceğin iki  
farklı hal<sup>3</sup> olduğu anlamına geliyor sadece. Bahçeye haktığında  
tavşanı yavaş hareket ederken bulma olasılığın olduğu gibi, biraz  
hızlı hareket ederken bulma olasılığın da vardır. Matematiksel  
olarak bunu açıklamanın yolu, iki dalgayı birbirine eklemektir."

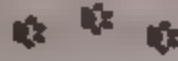
3. Fizikte "hal" bir özellikler toplamını konum momentum enerji vs. top-  
lamını ifade eder. Bahçede belli bir momentumu olan bir tavşanın bir m-  
mentum halinde olduğu söylenir. Aynı bahçede aynı momentuma sahip bir  
tavşan da aynı haldedir. Aynı bahçede farklı bir momentumu olan bir tavşan  
başka bir haldedir. Momentumu birinci tavşanınkiye aynı olan ama başka  
bir bahçede bulunan üçüncü bir tavşan üçüncü bir haldedir vs.

1. Kuantum  
2. Kuantum  
3. Kuantum  
4. Kuantum  
5. Kuantum  
6. Kuantum  
7. Kuantum  
8. Kuantum  
9. Kuantum  
10. Kuantum  
11. Kuantum  
12. Kuantum  
13. Kuantum  
14. Kuantum  
15. Kuantum  
16. Kuantum  
17. Kuantum  
18. Kuantum  
19. Kuantum  
20. Kuantum

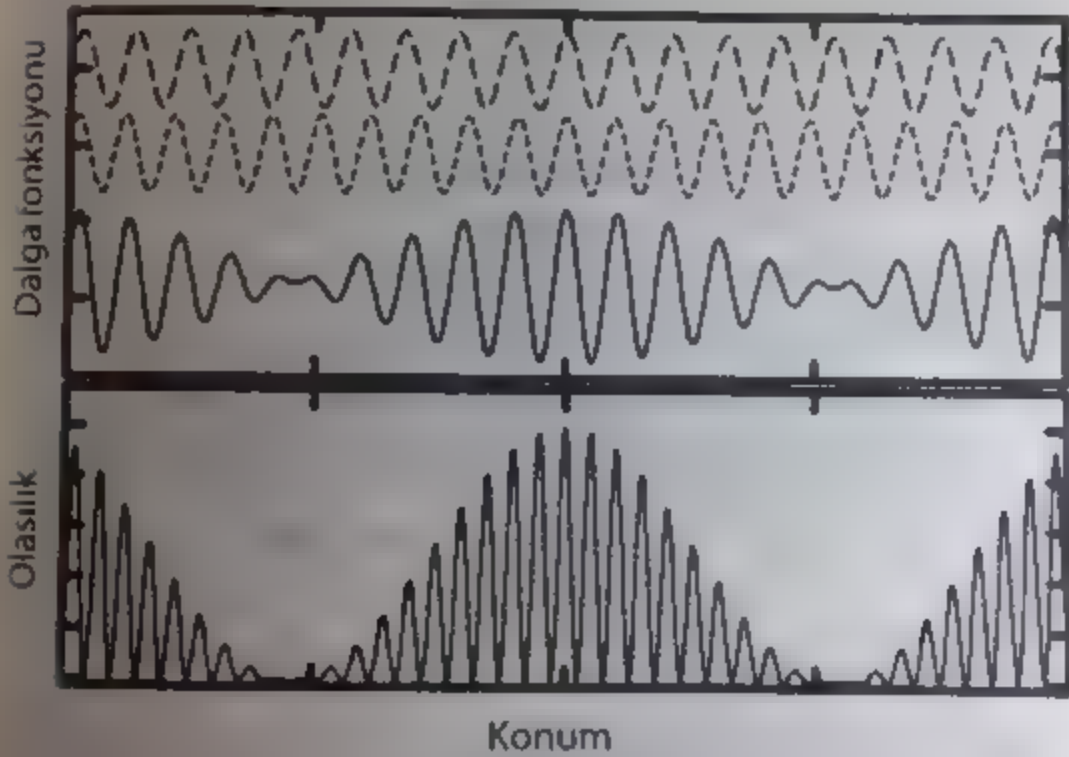


21. Kuantum  
22. Kuantum  
23. Kuantum  
24. Kuantum  
25. Kuantum  
26. Kuantum  
27. Kuantum  
28. Kuantum  
29. Kuantum  
30. Kuantum  
31. Kuantum  
32. Kuantum  
33. Kuantum  
34. Kuantum  
35. Kuantum  
36. Kuantum  
37. Kuantum  
38. Kuantum  
39. Kuantum  
40. Kuantum

"Ah Kahretsın. Daha çok tavşan olmasını ummuştum "



Bu iki dalgayı birbirine eklediğimizde, aynı fazda olup daha büyük bir dalga oluşturdıkları yerler olduğunu görürüz. Başka yerlerde zıt fazdadırlar ve birbirlerini iptal ederler. Dalgaları birbirine ekleyerek elde ettiğimiz dalga fonksiyonunda (şekildeki kalın çizgi) kumelenmeler vardır, dalgaları gördüğümüz yerler, hiçbir şey görmediğimiz yerler vardır. Olasılık dağılımını almak için bunları topladığımızda aşağıdaki grafiğe ulaşırız

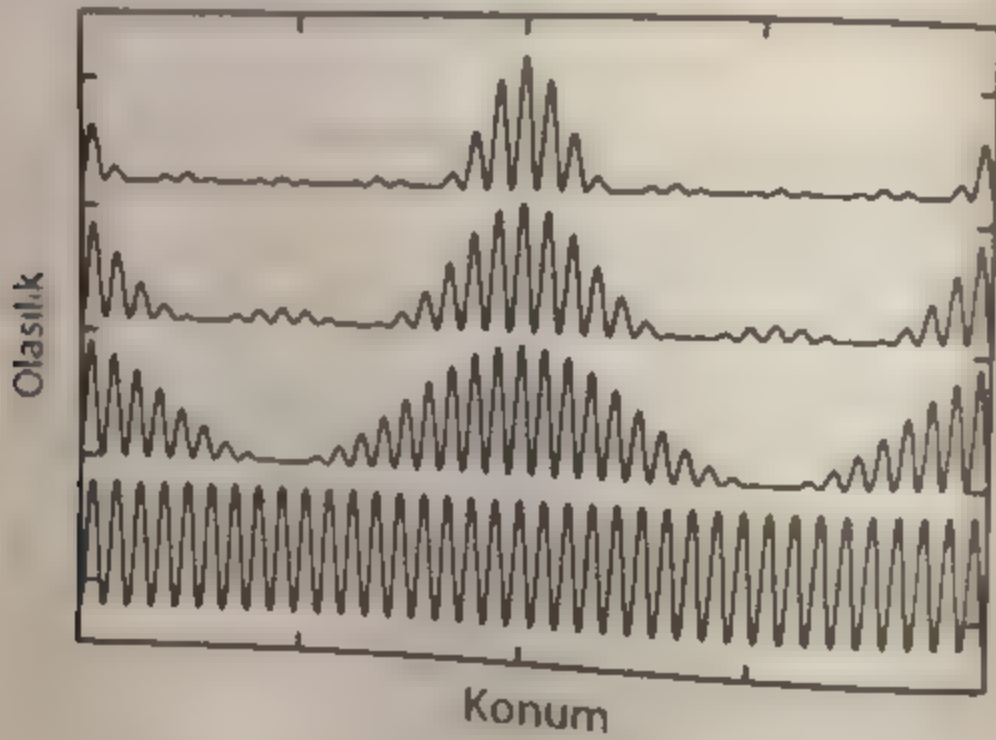


Yukarıdaki grafikteki yarıklı eğriler, iki farklı dalga boyunun dalga fonksiyonlarını gösterir (açıkça görmemiz için yukarıya çekilmiş). Kesintisiz çizgi iki dalga fonksiyonunun toplamını gösterir. Aşağıdaki grafik ise bu dalga fonksiyonlarının birbirine eklenmesi sonucu ortaya çıkan olasılık dağılımını verir (yukarıdaki grafikteki kesintisiz çizginin karesi)

Bu olasılık dağılımının orta kısmı, istediğimiz dalga paketi-

ne çok benzer görünmüyor. Tavşanı bulma olasılığımızın ...  
olacağı bu alan vardır. Bu alanda tavşanın hareketiyle ...  
dalga boyu görürüz. Bu alanın dışında olasılık sıfır olar ...  
alanını. Bu tavşanı görme umudumuzun olmadığı yerler ...  
dur.

Fahri ki bu iki dalga fonksiyonu tam istediğimiz şey değ ...  
çünkü hiç tavşanı bulunmayan bölge çok dar ve onu her ...  
ka bu kumelenme izliyor. Ama daha fazla dalga ekleyerek d ...  
mu iyileştirebiliriz.



En alttaki grafik tek frekanslı bir dalganın olasılık dağılımı ...  
dır, üstünde iki, üç ve beş frekanslı dalgaların grafikleri bulun ...  
maktadır.

Üç farklı dalgayı birbirine eklersek tavşanı görme olasılığımı ...  
zın yüksek olduğu bölge daralır, beş dalgayı eklersek daha da dar ...  
olur. Daha fazla sayıda dalgayı ekledikçe yüksek olasılık alanları ...  
daha da daralacaktır. Bu alanlar arasındaki boşluklar da daha ge ...  
niş ve düz olacaktır. Sonunda elimize geçen şey uzun bir dalga ...  
paketleri zinciri gibi görünmeye başlayacaktır.

"Bu durumda elimizde uzun bir tavşan zinciri var ha? Ben bir tek tavşandan bahsediyoruz sanmıştım "

"Bir tek tavşandan bahsediyoruz Elimizde her biri tek bir tavşanı bulabileceğimiz farklı bir yeri betimleyen farklı "dalga paketleri"nden oluşan bir zincir var Bunu daralıp tavşanın bulunabileceği tek bir konuma indirmek istersek düzenli aralıkları olan tek tek dalga boylarını değil de sürekli bir dalga boyları dağılımını birbirine ekleriz."

"İyi de bu sonsuz sayıda farklı dalga boyunu birbirine eklemek anlamına gelmeyecek mi?"

"Eh, evet, ama hesap makinesi de bunun için var zaten!"

"Ah, ben hesap makinesinde o kadar da iyi değilimdir."

"Çok az köpek ıydır. Sen benim sözümü dinle, farklı dalga boyları için farklı olasılıklar veren sürekli bir dalga boyları dağılımını toplayarak tek bir dalga paketi oluşturabiliriz."

"Sonunda elimizde sonsuz sayıda tavşan olur!"

"Üzgunüm ama hayır. Yine sadece bir tavşan var; ama birbirine çok yakın olan sonsuz sayıda olası hızda."

"Kahretsın. Ben daha çok tavşan olsun istiyorum hâlâ."

"Eh, sonsuz-toplam dalga fonksiyonu tavşanın konumunu gayet iyi tanımlar, böylece en azından o bir tavşanın nerede olduğunu bilebilirsin."

"Dogru Nerede olduğunu bilirsem de onu yakalayabilirim!"

### Gerçekliğin Sınırları: Belirsizlik İlkesi

Dalga boyları farklı birçok farklı dalgayı bu biçimde birbirine eklemek ne anlama geliyor? Her dalga, bahçede hareket halindeki (tek bir) tavşancık için belli bir momentuma, farklı bir yonlu hıza denk gelir. Bunların hepsini birbirine eklediğimizde, yaptığımız şey bu farklı hallerin her birinde tavşancığı bulma ihtimali-



mız olduğunu söylemektir (Bundan üçüncü bölümde biraz daha bahsedeceğiz.)

Bu hallerin birbirine eklenmesi, belirsizlik ilkesinin kökeninde yatar. Dar ve iyi tanımlanmış bir dalga paketi elde etmek, böylece tavşanın konumunu gayet iyi bilmek istiyorsak çok fazla sayıda dalgayı birbirine eklememiz gerekir. Her dalga tavşan için olası bir momentuma denk gelir, bu da momentuma büyük bir belirsizlik katar, tavşan çok sayıda farklı hızdan herhangi birinde hareket ediyor olabilir.

Ote yandan momentumu çok iyi bilmek istiyorsak az sayıda farklı dalga boyunu kullanabiliriz, ama bu da hize konumun büyük oranda belirsiz olduğu çok geniş bir dalga paketi verir. Tavşan birkaç olası hızla hareket ediyor olabilir, ama nerede olduğundan artık pek emin olamayız.

Sonsuz genişlikte dalga boyları dağılımını kullanmaksızın iyi tanımlanmış tek bir dalga paketi üretemeyiz; iyi tanımlanmış momentumu olan tek bir dalga paketini de bu paketi her yere yaymadan ortaya çıkaramayız. Yapmayı umabileceğimiz en iyi şey, en başta çizdiğimiz gibi, momentumda da konumda da küçük bir belirsizliğin olduğu bir dalga paketi çıkarmaktır. Matematiksel ayrıntılara girdiğimizde belirsizliklerin olası en küçük çarpımının şu meşhur Heisenberg ilişkisine uyduğunu görürüz.<sup>4</sup>

$$\Delta x \Delta p = h/4\pi$$

Konumdaki belirsizliğin ( $\Delta x$ ), momentumdaki belirsizlikle ( $\Delta p$ ) çarpımı Planck sabitinin  $4\pi$ 'ye bölünmesine eşittir. Başka

4- " $\Delta$ " sembolü, herhangi bir kardeşlik köpeğimin size söylevebileceği gibi Yunan harfi deltadır. Bilimde delta bir şeydeki değişikliği ya da iki şey arasındaki farkı ifade etmek için kullanılır.  $\Delta x$  konumdaki belirsizliktir yani nihayetinde ölçtüğünüz konum ile dalga fonksiyonunun verdiği en muhtemel konum arasındaki farklılık miktarıdır. "Büyük meşe ağacından on altı adım uzaga belki bir adım eksik ya da fazla olabilir, bir kemik gömdüm" derse "on altı adım" kemigün en muhtemel konumudur. bir adım eksik ya da fazla" ise  $\Delta x$ .

bir dalga paketinin (dogada birçok farklı şekil bulunur) daha büyük bir belirsizlik çarpımı olacaktır. bu yüzden de bu ilişki genellikle buyuktur ya da eşitlik işaretile yazılır

$$\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$$

Gelgelelim önemli sonuç aynı kalır. Ne yaparsanız yapın  $\Delta x$ ı da  $\Delta p$ ı da sıfır yapmanın bir yolu yoktur. birini küçültmeye çalıştığınızda diğeri mutlaka büyür ve çarpım Heisenberg sınırının üstünde kalır.

(1) halde dalga fonksiyonları bakımından incelendiğinde bu ilişkinin, bir sistemi bozmadan ölçme **konusundaki yetersizliği** mizden kaynaklanan pratik bir sınırın çok ötesine geçtiğini görebiliriz. Bu ilişki, gerçekliğin sınırlarıyla ilgili derin bir ifadedir. Birinci bölümde kuantum parçacıklarının parçacık gibi davrandığını görmüştük, fotonların momentumu vardır ve Compton etkisi çerçevesinde elektronlarla çarpışırlar. kuantum parçacıklarının dalga gibi davrandığını da gördük, **elektronlar, atomlar ve moleküller engellerin etrafında avrılır, girişim örüntüleri oluşturur**. Bu özellikler dizisinin ikisine de aynı anda sahip olmak için ödediğimiz bedel, konum ve momentumun her zaman belirsiz olmasıdır. Belirsizlik ilkesinin anlamı sadece konumu ve momentumu ölçmenin imkansız olması değil, bu niceliklerin mutlak anlamda var olmamasıdır.

## Belirsizliğin Tezahürleri: Sıfır Noktası Enerjisi

Belirsizlik ilkesi bizi, evrenin nasıl işlediğine dair anlayışımızı tamamen yeniden düşünmeye zorlar. Hareket halindeki tek tek parçacıklara bakışımızı değiştirmekle kalmaz, mikroskobik düzeyde maddenin yapısı açısından da derin sonuçları vardır.

Çogu insan, hatta birçok köpek atomları, eksi yüklü elektron

52  
ların artı vuklu çekirdek etrafında yörüngede döndüğü mini min  
güneş sistemleri olarak görür Bu tablo 1913'te, Niels Bohr an  
hidrojen atomu için ilk kuantum modelini önermesiyle doğmuş  
tur

Bohr'un modelinde bir hidrojen atomunun bir elektronu çekirdek etrafında, sadece çok belli bazı yörüngelerde ıvı tanımlanmış belli enerji değerleriyle döner Bu yörüngeler hidrojenin "mumkun olan haller"dir; mumkun olan haldeki bir elektron memnunvele orada kalacaktır Elektronlar arada kalmış enerjilerdeki yörüngelerde asla bulunamaz Fizikçiler bu hallerden genellikle, bunlar bir merdivenin basamaklarıymış, elektronlar da uuyacak yer arayan kopeklermiş gibi bahsederler Kopek zeminde ya da basamaklardan birinin üzerinde rahatça dinlenebilir, ama iki basamağın arasına yatma girişimi hüsrarla sonuçlanacaktır

Bohr'un modeli hidrojenin saldığı ve yuttuğu karakteristik ışık renklerini betimleme konusunda parlak bir biçimde işler Elektronlar, ışık fotonlarının vutulması ve salınmasıyla izinli durumlar arasında hareket edebilir, salınan ışığın frekansı iki hal arasındaki enerji farklılıklarına tekabül eder Bohr modeli böylece fizikçileri yıllarca bunalıtmış bir problemi çözmüştür Bohr bu model önerdiğinde, önceki fizikten cesur bir kopuşu ortaya koymuştu Maalesef bu model klasik ve kuantum fikirlerinin, sağlam bir kuramsal açıklama olmaksızın birbirine harmanlanmasıydı Louis de Broglie'un elektrona ilişkin dalga modeli kayıp kuramsal temeli sağlar, fakat parçacık-dalga ikilemi izinli durumlar fikrini açıklasa da gezegenlerin güneşin etrafında dönmesi gibi elektronların da çekirdeğin etrafında yörüngede döndükleri imgesinden vazgeçmemizi gerektirir Bu tablodaki temel sorun, belirsizliğe yol açanla aynı meseledir Güneş sistemi modelinin doğru olabilmesi için elektronun mumkun olan yörünge üzerinde ıvı tanımlanmış bir konumu ve

onu bu yörüngede hareket ettiren iyi tanımlanmış bir momentumu olması gerekir. Fakat bunun işlemesi mümkün değildir. Elektronun konumunu gezegensel bir yörüngede saptayacak kadar iyi tanımlamaya çalıştığımızda momentumunda büyük bir belirsizlik olması gerekir, bu da nereye gittiğini söyleyemeyeceğimiz anlamına gelir. Elektronun momentumunu, onu bir yörünge üzerinde saptayacak kadar iyi tanımlamaya çalıştığımızda da konumunda büyük bir belirsizlik olması gerekir, bu da elektronun, yörüngesinde olduğu varsayılan çekirdeğin yakınında olup olmadığından bile emin olamayacağımız anlamına gelir.

Elektronun dalga niteliğini dikkate aldığımızda, gezegenler olarak elektronlar fikrini bir kenara bırakmak zorunda kalırız. Elektron çekirdek etrafında kabarcık bir tür "bulut" içinde döner. Konumu belirsizdir, ama çekirdeğin yakınlarındaki bir bölgeyle sınırlıdır, momentumu belirsizdir, ama onu çekirdeğin yakınlığında tutacak değerlerle sınırlıdır. Bohr'un mümkün olan enerji halleri fikri hâlâ geçerlidir, elektron her zaman Bohr'un kuramında öngörülen sınırlı enerji değerlerinden birinde olacaktır, ama bu haller artık elektronların belli yörüngelerde donmasına tekabül etmez.

"Bir dakika, bir dakika! Elektronun belli bir yeri yok da çekirdeğin yakınlarında gibi öyle mi?"

"Evet öyle. Farklı enerji halleri, elektronları belli konumlarda bulma konusunda farklı olasılıklara denk düşer; yüksek enerji halleri de elektronu çekirdekten uzakta bulma olasılığını, düşük enerji hallerine göre artırır. Fakat mümkün olan hallerin herhangi birinde, elektron çekirdekten sadece birkaç nanometre uzakta olabilir."

"Peki, iki atomu birbirine yaklaştırırsan ne olur?"

"Eh, iki atomu yeterince birbirine yaklaştırırsan, kuantum konumundaki bu belirsizlik yüzünden bir atoma bağlı bir elektron diğer atoma geçebilir. Buna altıncı bölümde, tunellemeden



hahsederken biraz daha değineceğiz "

"Tamam."

"Bir elektronun iki atom arasında 'paylaşıldığı' durumlar da olabilir. Kimyasal bağlar böyle kurulur. Bir avuç atom birlikte katılaşır, bir elektron bütün katıda paylaşılabilir. Metallerin nasıl elektrik ilettiğini, yarı iletken bilgisayar yongalarının nasıl yapıldığını anlamamızı sağlayan kuantum katılar kuramının temeli budur. Butun bunlar, elektronlar belli gezegensel vorungelerin ötesine geçebildiği için olur."

"Belirsiz elektronlar da pek tuhafmış."

"Doğrusunu söylemek gerekirse sadece elektronlar da değil. Evrendeki her şey belirsizlik ilkesine tabidir ve kesin olmayan bir konumda, kesin olmayan bir yönlü hızdadır."

"Bu doğru olamaz. Demek istediğim kemiğimi görüyorum işte. Tam şurada, kesin bir konumu var ve yönlü hızı da sıfır."

"Ah, ama kemiğinle ilişkili kuantum belirsizliği, onu ölçmekle ilgili pratik belirsizlik yüzünden çok kuçulur. Kemiğine gerçekten dikkatli bakarsan, konumunu bir milimetrelik bir hata payıyla saptayabilirsin."

"Ben kemiğime hep dikkatli bakarım."

"ve kahramanca bir çabayla bu hata payını yüz nanometreye indirebilirsin. Bu durumda yüz gramlık kemiğinin yönlü hız belirsizliği sadece 10-27 m/s olacaktır; yani yönlü hız sıfır artı ya da eksi 10-27 olacaktır."

"Hımm, bu bayagi yavaş."

"Evet, öyle de diyebiliriz. Bu hızda tek bir atomun enini aşmak evrenin yaşı kadar yavaş alır."

"Eh, gerçekten de yavaşmış."

"Gündelik nesneler çok büyük oldukları için, onlarla ilişkili kuantum belirsizliğini görmeyiz. Belirsizliği doğrudan, çok küçük yerlerle sınırlanmış çok küçük parçacıklara baktığımızda doğrudan görürüz."

"Atomların yakınındaki elektronlar gibi!"

"Aynen öyle "

Belirsizliğin atomların yapısı üzerinde daha da derin başka bir etkisi vardır. Elektronların hem konumları hem momentumlarında belirsizlik olmalıdır, bu da bir atomdaki bir elektronun enerjisinin asla sıfır olamayacağı anlamına gelir. Bir atomun parçasıyken sıfır enerjide olması için bir elektronun hareket etmiyor, çekirdeğin tepesinde oturuyor olması gerekir. Daha önce de gördüğümüz gibi bu imkânsızdır, buna en yaklaşılabileceğimiz nokta, çekirdeği merkez alan, momentumun sıfır olmadığı birçok farklı halı kapsayan dar bir elektron dalga paketi çıkarmak olacaktır. Bu durumda, hidrojenin en düşük enerjili ızınlı durumunda bile bir enerji vardır.

Bu genel bir fenomendir ve sınırlanmış bütün kuantum parçacıkları için geçerlidir. Bir parçacığın uzayın belli bir bölgesinde olduğunu bilmemiz, konumun belirsizliğini sınırlar, momentumun belirsizliğini artırır. Sınırlanmış kuantum parçacıkları hiç durmazlar, bir sepetin içindeki köpek yavruları gibidirler; hep kıpır kıpırdırlar, yerlerinde duramazlar, uykudayken bile hareket edip dururlar.

Bu küçük hareket kalıntısına sıfır noktası enerjisi denir, sıfır noktası enerjisi, sınırlanmış olmasından oturu bir parçacıkla ilişkili olan minimum kuantum enerjisidir. Sıfır noktası enerjisi sınırlanmış bir parçacığın sahip olabileceği enerjiye mutlak bir alt sınır getirir; sistemi ne kadar tıtlı hazırlarsanız hazırlayın o sistemdeki parçacıklar her zaman hareket halinde olacaklardır, rastgele küçük dalgalanmalar parçacıkların vonlu hızlarının büyüklüğünü ve yönünü sürekli değiştirecektir.

Sıfır noktası enerjisi, kuantum fizikinde sezgilere en fazla ters düşen fikirlerden biridir; bize hiçbir şeyin hiçbir zaman tam bir durma halinde olmayacağını söyler. Bu, bir sistemde siz sistemin bütün enerjisini almak için ne kadar çabalarsanız çabalayın her

zaman bir enerji olduğu anlamına gelir. Boş uzayın bile sıfır noktası enerjisi vardır; atomlardan kendiliğinden foton salımı ve boşlukta metal plakalar arasındaki "Casimir kuvvetleri" denilen mikrovavye kuvvetler de dahil olmak üzere bazı şaşırtıcı sonuçlara yol açar bu. Boş uzayın sıfır noktası enerjisi, dokuzuncu bölümde göreceğimiz üzere kısa ömürlü "sanal" parçacık çiftleri bile yaratabilir.

Sıfır noktası enerjisi muhtemelen belirsizlik ilkesinin en önemli tezahürlerinden biridir. Varlığı, evrenimizi oluşturan bütün parçacıkların kuantum niteliğinin doğrudan sonucudur.

"Yani bütün bunlarda asıl mesele, konum ve momentumun kesin değerleri olmaması, ha?"

"Evet, aynen öyle."

"Peki, bu sadece bunlar için mi geçerli?"

"Hayır. fiziksel nicelik çiftleri arasında birçok farklı belirsizlik ilişkisi vardır. Örneğin açısal momentumun belirsizliği vardır, dönen bir nesnenin hem yönünü hem dönme hızını aynı anda bilemezsin. Bir ışık huzmesindeki foton sayısıyla huzmeyle ilişkili dalganın fazı arasında da bir belirsizlik ilişkisi vardır. Belirsizlik ilişkilerine kuantum fizığının her yerinde rastlanır."

"Yani temelde, hiçbir şey mutlak anlamda belirli, tanımlı, kesin değildir, ha? Bu biraz şey Postmodern değil mi?"

"Yok, o kadar kötü değil, deney yapan farklı kişilerin kendi sonuçlarını ortaya çıkarması gibi bir durum yok. Kuantum etkilerinden kaynaklanan belirsizlik genellikle çok küçüktür; bu yüzden pratik amaçlarla makroskobik nesneleri sanki kesin özellikleri varmış gibi ele alabiliriz. Ama mikroskobik düzeyde bu niceliklerin hiçbirisi için tek bir kesin değer yoktur."

"Ama daha önce tavşanların kesin konumunu ölçmekten bahsetmiştin. Kesin konumları yoksa bu nasıl oluyor peki?"

"Çok güzel bir soru, bizi bir sonraki bölüme, yeni bir tuhaflık-  
lar alanına götürüyor."

Schrö  
Ko

...bardak su  
...arak .ceri g  
...m' Ne  
...bir k  
...odul  
...vevım  
...birden uza  
...an  
...umu çalısm  
...mak yok " E  
...et  
...kış  
...se  
...cevap  
...ke

### III

## Schrödinger'in Köpeği: Kopenhag Yorumu



Mutfakta bir bardak su içmekle meşgulüm, o sırada Emmy kuyruğunu sallayarak içeri giriyor "Bana bir ödül vermelisin," diyor

"Vermeli miyim? Neden sana ödül vermeliymişim?"

"Çünkü çok ıy bir köpeğim ve de ödülü hak ediyorum."

"Sana sebepsiz ödül vermeyeceğim," diyorum, "ama ne yapacağımı söyleyeyim." Ödül kavanozuna uzanıyorum, sonra ıkı yumruğumu birden uzatıyorum "Ödülün nerede olduğunu tahmin et, senin olsun."

Derhal burnu çalışmaya başlıyor.

"Koklamak yok." Ellerimi arkama saklıyorum "Ödül hangi elimde tahmin et "

"Hmm.. Olur ikisinde de."

"Hayır, böyle bir seçenek yok."

"Ama doğru cevap," diyor somurtup. "Kutudaki kedi gibi işte."

"Ne kutusu? Ne kedisi?"

"Hani var ya bir kedi kutunun içinde Şey var yanında da. Hem ölü hem diri. Kutuda "

"Schrödinger'in kedisi mi?"



"Hab iste. İste o!" Hevecanla kuyruğunu sallıyor. "O ben seviyorum. Yapmalısın."

Bir kere o kuantum tahminlerinin saçmalığını göstermek için tasarlanmış bir düşünce deneyi. Kimse gerçekte yapmam. Çünkü kedileri öldürmeye başlarsak insanların bunu beğenmesinden kışkuluyum."

"Çünkü umrunda değil. Kedileri kutulara koyma fikrini sevdim. Kedilerin veri kutuları."

"Evet bilim canına ilentim. Ama bunun senin odanınla ne ilgisi var?"

"Eh ödel sağ elinde de olabilir sol elinde de. Hangisinde olduğunu bilmiyorum. Nerede olduğunu bulmak için koklamamam. Zaten de vermiş olsun. demek ki ödül hem sağ hem sol elinde bir süperpozisyon durumunda. Hangi elinde olduğunu açuncaya kadar cevap vermiyorduk. Her iki elinde birden olduğu."

"İlgisi bir argüman. Ama burada geçerli değil."

"Evet geçerli. Temel kuantum hızı bu."

"Eh evet. Okalmemiş nesnelerin genel olarak süperpozisyon durumunda olduğu doğru" diyorum. "Ama bu süperpozisyon durumları son derece hassastır. Herhangi bir müdahale, tek bir fotonun vurulması ya da salınması bile bunların kesin bir değeri olan klasik hollere düşmesine yol açar."

"Ama insanlar bunları görmüştür."

"İbette. Vapılmış bir sürü kedi durumu deneyi vardır. Ama şimdiye kadar vapılabilmiş en huşuk süperpozisyonda yaklaşık bir milyar elektron vardı. Bu hiçbir şekilde bir köpek ödülünün huşukluluğuna yakın değildir. Köpek ödülleri yaklaşıktır. 10<sup>10</sup> atom bulunur."

"Ha?"

Bir de şu var. Kopenhag yorumunun en uç versiyonunda bile dalga fonksiyonu bilinçli bir gözlemcinin gözlemlene eylemiyle

1- Bakınız dördüncü bölüm

"Çokter Şimdi kimin gözlemci sayılacağını tartışabilirsin "

"Bir kedi olmaz, orası kesin. Kediler ahmak olur "

"Fvet, ama makul ölçütler çerçevesinde ben bir gözlemci sayılırım. Ödülün hangi elde olduğunu biliyorum. Bu yüzden klasik bir olasılık dağılımıyla uğraşıyorsun, ödül iki elden birinde. Ödülün aynı anda iki elde birden olduğu bir kuantum superpozisyonu ile uğraşmıyorsun "

"Ah, peki " Hayal kırıklığına uğramış gibi görünüyor

"Peki, tahmin et şimdi, hangi elimde?"

"Himm. Ben yine her ikisinde de diyorum "

"Nedenmiş o?"

"Çünkü ben mukemmel bir kopeğim, iki ödülü hak ediyorum!"

"Eh, peki. Ben de avanagın tekiyim " Ona ödüllerin ikisini de veriyorum.

"Ooo! Öduller!" diyor, mutlu mutlu çıgnerken

Kuantum mekanığını incelemenin en can sıkıcı yönlerinden biri, klasik dünyanın inatçı bir klasiçlik göstermesidir. Kuantum fizğinde her tür muhteşem şey görülür, dalga gibi davranan parçacıklar, aynı anda iki yerde birden olan nesneler, hem dışı hem olu olan kediler; ama yine de bunların hiçbirini etrafımızdaki dünyada görmeyiz. Gundelik bir nesneye bakışımızda onu kesin klasik bir halde görürüz; belli bir konumu, yonlu hızı, enerjisi vs. vardır. Kuantum mekanığının izin verdiği tuhaf durumlar bileşimlerinin hiçbirinde değildir. Parçacıklar ve dalgalar tamamen farklı görünür; kopekler bir engelin sadece şu ya da bu tarafına geçebilir, kedilerse inatçı, rahatsız edici derecede canlıdırlar, tuhaf köpeklerce koklanmaktan hoşlanmazlar.

Kuantum mekanığının daha tuhaf yönlerini ancak büyük bir çalışmayla, utuzlıkla denetlenen koşullar altında doğrudan gözleriz. Kuantum hallerinin dikkat çekici bir hassaslık gösterdiği,

kolayca bozulabilirliği gözlenmiştir, bu hassasiyetin sebebi te-  
men belirlenebilir değildir. Aslına bakarsanız kuantum kuramı  
nın gündelik kopekleri ve kedilerin bulunduğu makroskobik  
dünya için neden geçerli olmadığını belirlemek şaşırtıcı za-  
ta bir problemdir. Mikroskobik olandan makroskobik olana ge-  
çişte tam olarak neler olduğu geçen yüzyılın en iyi fizikçileri  
birçoğunu sıkıntıya sokmuştur, buna verilmiş açık bir cevap da  
yoktur.

Bu bölümde kuantum fizikini anlamamız açısından teme-  
nemdeki ilkeleri ortaya koyacağız: dalga fonksiyonları, izn  
durumlar, olasılık ve ölçüm. Kilit bir örnek sistem tanıta-  
cağız ve kuantum fizikinin bütün temel özelliklerini gösteren basit bir de-  
neyden bahsedeceğiz. Kuantum ölçümünün temel rastgeleliği-  
den ve bu rastgeleliğin doğurduğu, kuantum fizikinin bazı kur-  
ularının ondan tümesiyle vazgeçmelerine neden olacak kadar ra-  
hatsız edici buldukları felsefi sorunlardan söz edeceğiz.

## **Dalga Fonksiyonu Ne Anlama Gelir?**

### **Kuantum Mekanizinin Yorumu**

Kuantum mekanizıyla ilgili felsefi sorunların çoğu kuramın "yo-  
rumu" etrafında döner. Klasik fizik yoruma ihtiyacı olmadı-  
ğı için bu kuantum fizikine özgü bir sorundur. Klasik fizikte bir  
nesnenin konumunu, yönlü hızını ve ivmesini tahmin edersiniz;  
bu niceliklerin ne anlama geldiğini, onları nasıl ölçeceğinizi tam  
olarak bilirsiniz. Kuram ile gözlediğimiz gerçeklik arasında he-  
men kurulan sezgisel bir bağlantı vardır.

Oysa kuantum mekanizması, bu kadar belirsiz olmanın yakını-  
ndan bile geçmez. Kurama hükmeden, dalga fonksiyonlarını he-  
saplamamızı, onların davranışlarını öngörmemizi sağlayan ma-  
tematiksel denklemlerimiz vardır, ama bu dalga fonksiyonları

nın ne anlama geldiği o kadar açık değildir. Hesapladığımız dalga fonksiyonlarını deneylerde ölçtüğümüz özelliklere bağlamak için bir "yorum", fazladan bir açıklama katmanına ihtiyacımız vardır.

Kuantum mekanığının merkezi unsurları birçok farklı biçimde sunulabilir, konu hakkındaki kitapların sayısı kadar farklı biçim vardır, ama sonunda bunların hepsi de dört temel ilkeye dayanır. Bunları kuramın kilit ilkeleri, ilerleyebilmek için kabul etmeniz gereken temel kurallar olarak düşünebilirsiniz.<sup>2</sup>

### Kuantum Mekanığının Ana İlkeleri

1. **Dalga fonksiyonları:** Evrendeki her nesne bir kuantum dalga fonksiyonuyla betimlenir
2. **İzinli durumlar:** Bir kuantum nesnesi ancak sınırlı sayıda izinli durumlardan birinde gözlenebilir
3. **Olasılık:** Bir nesnenin dalga fonksiyonu onun izinli durumların her birinde bulunma olasılığını belirler.
4. **Ölçüm:** Bir nesnenin halini ölçmek, mutlaka o nesnenin halini belirler.

İlk ilke dalga fonksiyonu fikridir. Evrendeki her nesne ya da nesneler sistemi bir dalga fonksiyonuyla, uzayın her noktasında bir değeri olan matematiksel bir fonksiyonla betimlenir. Neyi betimlediğiniz önemli değildir; bir elektron, köpek maması, kutudaki bir kedi olabilir; ama bu nesnenin bir dalga fonksiyonu vardır ve bu dalga fonksiyonunun nereye bakarsanız bakın bir değeri vardır. Bu değer artı olabilir, eksi olabilir, sıfır olabilir hatta hayali bir sayı bile olabilir (-1'in kare kökü gibi), ama her yerde bir değeri vardır.

2- İnsanlarla birlikte yaşayan köpekler için "Mobilvaların ustune çıkma malısın" tarzı kurallar gibi



Schrodinger denklemini denilen (onu keşfeden Avusturyalı fizikçi ve tanınmış hırt<sup>3</sup> Erwin Schrodinger in adıyla) matematiksel bir formül, dalga fonksiyonlarının davranışlarına hükmeder. İlgilenilen nesneye dair bazı temel bilgiler dikkate alındığında Schrodinger denklemini bu nesnenin dalga fonksiyonunu hesaplamakta ve bu dalga fonksiyonunun zaman içinde nasıl değişeceğini belirlemekte kullanabilirsiniz, şimdiki konumu ve konulu hızı verildiğinde bir kopeğin gelecekteki konumunu tahmin etmek için Newton kanunlarını kullanabileceğiniz gibi Dalga fonksiyonu nesnenin gözlenebilir bütün özelliklerini belirler.

İkinci ilke, izinli durumlar fikridir. Kuantum kuramında bir nesne ancak belli hallerde gözlenebilir. Bu ilke "kuantum mekaniğinin" "kuantum"unu koyan ilkedir, bir ışık huzmesindeki enerji bir foton akışı olarak gelir; her foton bölünemeyecek bir ışık kuantumudur. Bir fotonunuz, iki fotonunuz, üç fotonunuz olabilir, ama asla bir buçuk ya da pi sayısı kadar fotonunuz olmaz.

Aynı şekilde, bir atom çekirdeğinin etrafında yorungede dönen bir elektron ancak belli çok özel durumlarda bulunabilir<sup>4</sup>. Bu hallerin her birinin belli bir enerjisi vardır, elektron her zaman bu enerjilerden birinde bulunacaktır, asla arada bir durumda bulunmayacaktır. Elektronlar belli bir frekansta ışık yutarak ya da salarak bu haller arasında hareket edebilirler, örneğin bir neon lambasının kırmızı ışığı, neon atomlarının iki durum arasındaki geçişinden kaynaklanır, ama elektronların bu sıçramaları bir

3- Schrödinger fiziğe katkıları kadar çapkınlığıyla da meşhurdur. Adını taşıyan bu denklemini birçok kız arkadaşından birıyla bir kayak tatilinde bulmuştu, kendisinin, hiçbir de karısı olmayan üç ayrı hanımdan kızları vardı. Karısı ilişkilerini biliyordu. Schrodinger'in sıradışı özel hayatı 1933'te Almanya'dan ayrılması sonrasında Oxford'da bir mevki edinemesine mal oldu, ama villar boyunca az çok açık bir şekilde biri bir melektaşının hanımı olan iki kadınla birden yaşamayı sürdürdü.

4- İkinci bölümün sonunda tartıştığımız üzere

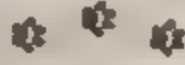
anda olur, aradaki enerjilerden geçmezler. İki durum arasındaki ciddi bir değişimi ifade eden "kuantum sıçraması" teriminin kökeni budur, gerçekte enerji sıçraması çok küçüktür, ama durumdaki değişiklik neredeyse hiç zaman almaz.

Üçüncü ilke olasılık fikridir. Bir nesnenin dalga fonksiyonu farklı mümkün hal olasılıklarını belirler. Diyelim ki bir köpeğin konumuyla ilgileniyorsunuz, dalga fonksiyonu size köpeğin oturma odasında bulma olasılığınızın çok yüksek olduğunu, yatak odasında bulmanızın daha düşük bir olasılık olduğunu, Jupiter'in uydularından birinde bulmanızın son derece düşük bir olasılık olduğunu söyleyecektir. Aynı köpeğin enerjisiyle ilgileniyorsanız dalga fonksiyonu size onu uyurken bulma olasılığınızın çok güçlü olduğunu, ortalıkta sıçrayıp havlarken bulma olasılığınızın güçlü olduğunu, uslu uslu matematik problemleri çözerken bulma olasılığınızınsa neredeyse hiç olmadığını söyleyecektir.

Felsefi problemler de bu noktada ışın içine girmeye başlar, çünkü dalga fonksiyonunun size vermediği şey kesinliktir. Kuantum kuramı yalnızca olasılıkları hesaplamanızı mümkün kılar, mutlak sonuçları değil. Köpeğin oturma odasında bulma olasılığı olduğunu, mutfakta bulma olasılığı olduğunu söyleyebilirsiniz, ama bakıncaya kadar nerede olduğunu söyleyemezsiniz. Aynı ölçümü aynı koşullarda tekrarlayacak, öğleden sonra dörtte "Köpek nerede?" diye soracak olursanız farklı günlerde farklı sonuçlar alırsınız, ama bütün sonuçları bir araya getirdiğinizde dalga fonksiyonunun öngördüğü olasılığa denk dustuklerinizi görürsünüz. Tek bir ölçümde neler olacağını önceden söyleyemezsiniz, ancak ve ancak tekrarlanan birçok deneyin ardından neler olacağını söyleyebilirsiniz.

Kuantum rastgeleliği klasik fizikle yetişmiş insanlar için muazzam derecede rahatsız edici bir fikirdir; klasik fizikte deneyinizin başlangıç koşullarını yeterince iyi biliyorsanız sonucu mutlak bir kesinlikle tahmin edebilirsiniz: Köpeğin mutfakta olaca-

ğını bilirsiniz, bakmanız da sadece zaten bildiğiniz şeyi teyit eder.  
Gerçi kuantum mekaniği bu şekilde işlemez. Aynı biçimde hazırlanmış deneyler tümüyle farklı sonuçlar verebilir, bunun tarafında edebileceğiniz de olasılıklardır. Bu rastgelelik Einstein'ın "Tanrı tavren'le zar atmaz" diye özetlenebilecek<sup>5</sup> çeşitli yorumlarda bulunmasına neden olan felsefi meseledir.



"Fizikçiler aptal."

"Neden öyle diyorsun?"

"Rastgelelikte rahatsız edici olan ne var ki? Ben hiçbir şeyin sonucunu o şey olmadan önce kesin olarak bilemiyorum. Halimden de gayet memnunum."

"Eh, sen bir kopeksin, fizikçi değilsin. Ama iyi bir noktaya parmak bastın. Klasik fizikğin sorumlu bir biçimde pratik olarak ele alındığı her durumda, tahminlere bir olasılık unsuru dahil edilmelidir. Bir deneyin sonucunu etkileyebilecek bütün küçük sapmalar açıklanamaz çünkü."

"Brezilya'daki şu kelebek gibi mi? Havayı bozuyor hanı?"

"Aynen öyle. Bildik metafordur. Amazon'da bir kelebek kanatlarını çırpıp, bir hafta sonra Schenectady'de bir fırtına kopar. Hava durumunu etkileyebilecek bütün kelebekleri tek tek hesaba katamayacağımı, bu yüzden klasik fizikte bile olasılığın kaçınılmaz olduğunu gösteren kaos kuramının klasik örneğidir."

"Aptal kaos kelebekleri."

"Mesele şu. Kuantum olasılığı tümüyle farklı bir oyundur."

<sup>5</sup> Einstein'ın kuantum mekaniğinin olasılıklara davalı niteliği hakkında söyleyeceği birçok olumsuz şey vardı, ama bu bildik sözün kökeni 1926'da Max Born'a yazdığı, "Kuram çok şey veriyor ama bazı ihtiyarın sırrına pek yaklaşılmıyor. Ben O'nun zar atmadığına kanıyorum" dediği mektuptur. (David Lindley'in Uncertainty adlı kitabında aktarılmıştır. s. 137)

Klasik fizikte karşımıza çıkan olasılıklar pratik birer sınırlama-  
dır. Bir mucize eseri dünyadaki bütün kelebeklerin izini gerçek-  
ten sürebilseydin, hava durumunu en azından bir süreliğine ke-  
sin olarak tahmin edebilirdin. Kuantum fizikiyse buna imkân ta-  
nımaz.”

“Kelebekler belirsizlik ilkesinin kapsama alanına girer, bu  
yuzden nerede olduklarını bilemezsin mi demek istiyorsun?”

“Sadece kısmen, bundan daha derin. Kuantum fiziginde aynı  
deneyi aynı koşullar altında, son kelebeğin kanat çırpışına varın-  
caya kadar, ikinci kez gerçekleştürsen bile ikinci deneyin kesin  
sonucunu yine tahmin edemezsin; sadece çeşitli sonuçlara varma  
olasılığı elde edersin. Birbirinin aynı iki deney farklı sonuçlar ve-  
rebilir ve verecektir.”

“Haa.. Bak ne diyeceğimi biliyor musun? Bu bir hayli rahatsız  
edici. Belki de o kadar aptal değilsinizdir.”

“Güvenin için teşekkürler.”

Kuantum kuramının son ilkesi, ölçüm fikridir. Kuantum me-  
kaniginde ölçüm etkin bir süreçtir. Bir şeyi ölçme eylemi, göz-  
lemlediğimiz gerçekliği yaratır<sup>6</sup>

Somut bir örnek verelim. İki kutudan birinde bir ödül oldu-  
ğunu düşünelim. Kutular kapalı, ses geçirmiyor (bu yuzden odu-  
lun tıktısını duyamıyorsun), hava geçirmiyor (kokusunu alamı-  
yorsun); ödülün hangi kutuda olduğunu kutulardan birini açma-  
dan söyleyemıyorsun.

Bunu bir kuantum mekanığı nesnesi olarak betimlemek ister-  
sek iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonu yazmamız gerekir,  
bir kısım ödülü soldaki kutuda bulma olasılığını betimler, diğer  
kısımsa sağdaki kutuda bulma olasılığını. Tıpkı önceki bölüm-

<sup>6</sup> Werner Heisenberg, ölçüm sonuçlarının tek gerçeklik olduğunu, ölçüm-  
ler arasında bir elektronun nerede olduğundan ve da ne yapıyor olduğun-  
dan bahsetmenin hiçbir anlamı olmadığını söyleyecek kadar ileri gitmiştir



de taysanların durumlarını ekleyerek bir dalga paketi oluştururken yaptığımız gibi, bunu ödülün sadece soldaki kutuda olmasının dalga fonksiyonlarını birbirine ekleyerek ve sadece sağdaki kutuda olmasının dalga fonksiyonlarını birbirine ekleyerek yapabiliriz.

Şimdi kutulardan birini açtığını ve ödülü bulduğunu, sonra da kutuyu yeniden kapattığını düşün. Yine elinde bir ödül var, ama kutu olacak, ama ödülün konumunu ölçtün. **Dalga fonksiyonu neye benzer?**

Dalga fonksiyonu artık sadece bir kısımdan oluşur. Ödülün soldaki kutuda olduğunu belirleyen kısım, çünkü ödülün tam olarak nerede olduğunu biliyoruz. Ödülü soldaki kutuda bulursan, bir dahaki sefere kutuyu açtığında, orada olması olasılığı yüzde 100'dür. Sağdaki kutuda bulma olasılığınsa yüzde 0'dır. Kutuyu açmadan önce dalga fonksiyonunun orada duran diğer kısmı, yaptığın ölçüm sonucu ödülün sağdaki kutuda olma olasılığı ortadan kalktığı için gitti.

Şimdi bu kutuları atalım, ilk çiftle aynı biçimde hazırlanmış iki yeni kutu alalım, yine iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonunun olacak. Ama bu sefer ilk kutuyu açman ile de ilk kutu çiftinde aldığın sonucun aynısını vermeyecek. Bu sefer ödülü sağdaki kutuda da bulabilirsin pekala. **Açarsan, kutuları kapatıp yeniden açmayı sürdürürsen ödülü hep sağdaki kutuda bulacaksın. Yine iki kısımlı bir dalga fonksiyonundan tek kısımlı bir dalga fonksiyonuna geçeceksin.**

Peki, bunda abartacak ne var? Nihayetinde olasılık böyle işler, öyle değil mi? İlk deneyde ödül hep soldaki kutuda idi, ama bulmıyordun. İkinci deneydeyse sağdaki kutuda idi. Ödülün durumu değişmedi, senin onun durumuyla ilgili bilgin değişti.

Kuantum olasılıkları bu şekilde işlemez. Elimize iki kısımlı bir dalga fonksiyonu olduğunda (bu, **superpozisyon** üst üste gelme durumu), bu nesnenin iki durumdan **birinde olduğu**

anlamına gelmez; nesnenin aynı anda iki durumda birden olduğu anlamına gelir. Köpeğin ödülü hep soldaki kutuda değildir, sen kutuyu açıp da birinde ya da diğerinde olduğunu buluncaya dek aynı anda hem soldaki hem sağdaki kutudadır.

"Bak bu çok tuhaf. Neden buna inanalım ki?"

"Eh, kuantum mekanığının tuhaf vonlerini, kuantum siliçidenilen bir deneyle gösterebiliriz."

"Ooo! Sevdim bunu! Hadi birkaç kedi silelim!"

"Makroskobik nesneler üzerinde işlemez. Polarize ışık kullanılır bu deneyde, önce onu açıklamam gerek."

"Vay! Neden silemiyoruz?"

"Olabilirdiğince kısa tutacağım ama bu önemli bir mevzu. Polarize ışık kuantum etkilerine somut örnekler vermek için eldeki en iyi sistem. Bu bölümde, ayrıca yedinci ve sekizinci bölümlerde ihtiyacımız olacak."

"Eh, peki, öyle olsun. Sonra ben silebileyim de."

"Ne yapabileceğimize bakınız."

## Süperpozisyon ve Polarizasyon: Bir Örnek Sistemi

Hem süperpozisyon durumlarının varlığını hem de ölçümün etkilerini ışığın polarizasyonunu (kutuplaşmasını) kullanarak gösterebiliriz. Polarize (kutuplaşmış) fotonlar kuantum mekanığının öngörülerini sınamakta son derece yararlıdır. Sonraki bölümlerde tekrar tekrar karşımıza çıkacaklar, bu yüzden ışığın bir dalga olması fikrinden ileri gelen ışığın polarizasyonunu tartışmaya biraz zaman ayırmamız gerekiyor.

Bir dalga, örneğin bir ışık huzmesi, beş özellikle tanımlanır. Bunların dördünden daha önce bahsettik: dalga boyu (dalga örüntüsünde tepeler arasındaki mesafe), frekans, belli bir nok-

tada dalganın saniyede kaç kere salındığı), büyüklük (bir dalga-  
nın tepesiyle çukuru arasındaki mesafe) ve dalganın hareket et-  
tiği yön. Beşinci özellik polarizasyondur, polarizasyon temelde  
dalganın salındığı yöndür. Yürüyüş yapmak için dışarı çıkmış sa-  
bırsız bir köpek sahibi, tasmanın kayışını aşağı yukarı sallayarak  
köpeğin dikkatini çekmeye çalışır, tasmanın kayışında dikey ola-  
rak polarize bir dalga oluşur, köpek sahibi tasmayı iki yana sallat-  
tığında da yatay polarize bir dalga oluşacaktır.

Sallanan bir kayış gibi, klasik ışığın da kendisiyle ilişkili bir  
salınım yönü vardır. Salınım her zaman hareket yönüne dik açı-  
lardadır, ama bunun etrafında herhangi bir yönde olabilir (yani  
ışığın hareket ettiği yöne göre sol, sağ, yukarı ve da aşağı olabi-  
lir). Fizikçiler bir ışık huzmesinin polarize halini genellikle salı-  
nım yönünü işaret eden bir okla gösterir; dikey olarak polarize  
olmuş ışık huzmesi yukarıyı gösteren bir okla, yatay olarak pola-  
rize olansa aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi sağ tarafı işaret eden  
bir okla temsil edilir



Sol: Dikey polarizasyon yukarıyı gösteren bir okla temsil  
edilir. Orta: Yatay polarizasyon sağa gösteren bir okla tem-  
sil edilir. Sağ: Yatay ile dikey arasında kalan polarizasyon,  
yatay ve dikey bileşenlerin bir toplamı olarak düşünülebilir.



"Dur bakalım, bu resimler nereden çıktı şimdi?"

"Düşün ki ışık huzmesinin hemen arkasındasın, hareket yönüne bakıyorsun. Ok, dalganın salınım yönünü gösteriyor. Yukarı doğru bir ok dalganın yukarı aşağı hareket edeceğini göreceğin anlamına gelir; sağa doğru bir oksa yanlara hareket edeceğini göreceğin anlamına."

"Yani. . . Yukarı bakan bir ok yukarı aşağı zıplayan bir tavşanın peşinden koşmaya, sağa bakan bir ok da ileri geri zıkzıklar çizen bir sincabı izlemeye benziyor, ha?"

"Tabii bu işe yarar."

"Yukarı ve sağdan başka bir seçenek yok mu?"

"Başka yönlerde de oklar olabilir. Sola bakan bir ok da yanlara salınımı gösterir, ama sağa bakan okla zıt fazdadır."

"Yani sağa bakan ok, önce sağa giden bir sincap, sola bakan ok da önce sola giden bir sincap, öyle mi?"

"Evet. Av hayvanlarında ısrar ediyorsan öyle."

"Av hayvanlarına bayılırım!"



Bir dalganın polarizasyonu yatay ya da dikey olabileceği gibi ikisinin arasında kalan bir açıda da olabilir. Biraz önceki şekilde gösterildiği gibi ara açıları, bir yatay ve bir de dikey parçadan oluşuyorlarmış gibi düşünebiliriz. Bu bileşenlerin her biri toplam dalga kadar yoğun değildir (yani, şekilde okların uzunluğuyla gösterildiği gibi büyüklükleri daha küçüktür); ama birbirlerine eklendiklerinde bir açıda aynı nihai yoğunluğu verirler. Bu eklenmeyi adımların birleşmesi olarak düşünebilirsiniz: tıpkı bir noktadan diğerine ya doğuya doğru üç adım, ardından kuzeye doğru dört adım ya da 37 derece kuzeydoğuya doğru beş adım atarak gittiğimiz gibi.

"Yani ara açı, sağa ve sola zıkzak çizerken aşağı yukarı zıpla-



yan bir tavşana benziyor?"

"Evet, öyle."

"Ya da sola ve sağa zikzak yaparken, yukarı aşağı sıçrayan bir sincaba?"

"Bence bu kadar av örneği şimdilik yeter."

"Hiç komik değilsin."

Ara polarizasyonları yatay ve dikey bileşenlerin bir toplamı olarak düşünmek ise yarayan bir numaradır. çünkü ışık polarize edici (kutuplaştırıcı) bir filtreyle karşılaştığında neler olduğunu görmemizi kolaylaştırır. Polarize edici filtreler belli bir açıyla gelen, örneğin polarizasyonu dikey olan ışığın engellenmeden geçmesine imkân veren avgıtlardır; polarizasyonu bundan 90 derece büyük, yani yatay olan ışığı ise tamamen soğuracaklardır. Bu etkiyi anlamak için tasmalı bir kopeği bir çitü aşarken düşünebilirsiniz. Tasmanın kavışını yukarı aşağı sallarsanız dalga doğruca geçecektir, ama yanlara sallarsanız çitler kavışı engelleyecektir.

Dikey ve yatay arasındaki bir açıdan gelen ışık, dikey duran polarize edici bir filtreye çarpığında, ışığın sadece dikey bileşeni filtreden geçecektir. Bu durumda, oteki tarafa geçen ışığın yoğunluğu, açıya bağlı olarak bir miktar azalır. Küçük açılar söz konusu olduğunda ışığın büyük bölümü filtreden geçer, obur tarafa geçen huzme, ilk huzmenin dörtte üçü oranında parlak olur. Daha büyük açılar söz konusu olduğundaysa ışığın büyük bölümü engellenir, dikeye 60 derecelik bir açıda filtrenin obur tarafına geçen huzme ilk huzmenin ancak dörtte biri kadar parlaktır. Yatay ve dikeyin arasında kalan 45 derecelik bir açıdan gelen ışığın tam yarısı dikey duran filtreden geçecektir.

Filtrenin obur tarafına geçen ışık, hangi açıyla başlamış olursa olsun, filtrenin durduğu açıda polarize olur. Bu yüzden polarize edici filtrelerle genellikle polarize ediciler (kutuplaştırıcılar) denir. Dikey duran polarize edici bir filtreden geçen ışık, yola devam eder.

key polarizasyonla da başka bir açıyla da başlamış olsa öbür taraftan dikey olarak polarize olmuş ışık olarak çıkacaktır. Işığın toplam miktarı baştakinden farklı, ama polarizasyonu polarize edicinin konumuyla aynı olacaktır. Dikey duran bir filtreden geçen ışığın tamamı ikinci bir dikey filtreden geçer, yatay duran bir filtredeyse tamamı engellenir.

"İyi de bütün bunlar neye yarıyor?"

"Kuantum fizikini göstermekten başka mı? Çok şeye. Işık polarizasyonu son derece yararlı bir şeydir. Kol saatleri, cep telefonları ve televizyonlardaki dijital göstericiler, geçen ışığın miktarını ayarlamak için bir ışık kaynağının önünde duran bir polarize ediciden yararlanır. Polarize edici filtreler güneş gözlüklerinde de kullanılır."

"Güneş gözlükleri mi?"

"Evet ya, seni yuruyüşe çıkardığımda taktığım o güneş gözlükleri aslında polarize edici filtreler. Güneşten gelen ışık polarize değildir; yatay olabileceği gibi dikey de olabilir, ama ışık bir yüzeyin üstüne yansıdığı anda, hafifçe polarize olma eğilimindedir. Biz yürürken önümüzdeki yoldan yansıyan ışık dikeyden çok yatay polarize olmuştur; bu yüzden de dikey polarize edicileri güneş gözlüğü olarak taktığında bu ışığın büyük bölümünü engellersin."

"İyi de bunun amacı ne? Görmeyi zorlaştırmıyor mu?"

"Aslında yolun parlamasını azaltıyor ve önündeki şeyleri görmeyi kolaylaştırıyor."

"Şeyler mi? Yoldaki tavşanlar gibi mi?"

"Evet, onun gibi."

"Benim de polarize güneş gözlüklerim olsa da tavşanları görebilsem!"

"Benim taktıklarım senin kulaklarına uymaz, ama bakarız. Sonra Önce polarize ışıkla kuantum ölçümünden bahsetmem gerekiyor."

“Ah, evet ya Kuantum fiziği Doğru ”

Peki, bütün bunlar parçacık olarak ışığa nasıl uygulanır? Birinci bölümün epeyce bir kısmını bir ışık huzmesinin nasıl hem bir foton akışı hem de yumuşak bir dalga olduğunu betimlemeye ayırdık. Son birkaç sayfadır da klasik anlamda polarizasyonu tartışıyoruz. Işık polarizasyonunu kuantum fiziğinde nasıl ele alı-  
rız?

Klasik ışık dalgalarıyla uğraştığımızda bir dalganın bir kısmının filtreden nasıl geçebileceğini anlamak kolaydır. Oysa ışıktan fotonlar olarak bahsettiğimizde, filtre ya hep ya hiç demek gibidir. Bir foton filtreden ya geçer ya da filtre onu yutar. Fotonların “parçaları” yoktur.

Fotonlar ile polarize edici filtreler arasındaki ilişkiyi, her fotonun filtreden geçme olasılığının, klasik modele göre toplam dalganın filtreden geçen kısmına eşit olduğunu söyleyerek kuruyoruz. 60 derece dikey polarize edilmiş bir ışık huzmesi dikey bir polarize edici filtreyle karşılaşır, filtrenin obür tarafına geçen huzme öncekinin dörtte biri kadar parlak olacaktır, yani foton sayısı, ilk huzmedeki foton sayısının dörtte biri kadar olacaktır. Bu da tek tek her fotonun polarize edici filtreden geçme şansının dörtte bir olduğu anlamına gelir.

Filtreden geçen her fotonun polarizasyonu filtre tarafından belirlenmiş olacaktır. Dört fotondan ancak biri, dikey duran polarize edici filtreden geçebilir; ama bu fotonların her biri ikinci bir dikey filtreden geçecek, hiçbirini de yatay bir filtreden geçemeyecektir.

O halde “dikey” ve “yatay” tek bir fotonun polarizasyonunun izini durumlarıdır. bir filtre kullanarak polarizasyonu ölçtüğümüzde fotonu arada bir yerde değil, bu iki halden birinde buluruz (ya dikey filtreden geçer ya da dikey filtre onu söğürür).

Bu yüzden polarize fotonlar, kuantum mekanığının kilit ilke-

lerine bakmak için mukemmel bir sistem sunar. Tek tek her foton, iki ızınlı duruma, yatay ve dikey polarizasyona denk gelen iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonu olarak betimlenebilir. Bu dalga fonksiyonu, fotonun polarize edici filtreden geçme olasılığını verecektir, bir filtreyle polarizasyon ölçümünü gerçekleştirmeniz sonrasında, fotonlar ızınlı durumların sadece birindedir. Tek bir fotonun polarize edici filtreden geçmesi kuantum fizığının bütün temel yönlerini gösterir. Sonuçta polarize fotonlar, kuantum fenomenlerini gösteren birçok deneyde kullanılmıştır.

"Bir dakika, ben şimdi bütün bunları bir doğrultayım. Yatay ile dikey arasındaki bir açıda bulunan bir foton superpozisyon durumunda, öyle mi? Bu fotonu polarize edici filtreye göndermek de onu ölçmekle aynı şey mi?"

"Evet. Tek tek polarize edilmiş fotonları kullanarak kuantum süperpozisyonunun ve ölçümün bütün yönlerini; dalga fonksiyonlarını, ızınlı durumları, olasılığı ve ölçümü elde etmiş oluyorsun."

"Ama klasik bir dalga olarak ışıktan bahsettiğinde, bütün bunların aynı biçimde işlediğini söyledin sanırım."

"Evet, öyle. Sonuçta varılan nokta, klasik polarize dalga tanımıyla aynı."

"İyi de o zaman mesele ne peki? Kuantum tuhaflığına dair verdiğin büyük örnek, klasik sonuçlar üreten bir şey oluyor yani?"

"Yo, hayır. Demek istediğim benim büyük örneğim bu değil. Kuantum tuhaflığına dair büyük örnek bir sonraki kısımda."

"Eh, peki, devam et o zaman."



## Bir Fotonu Ölç(me)mek: Kuantum Silici

Kuantum superpozisyon durumlarının tuhaflığını göstermenin en iyi yollarından biri, kuantum silici denilen bir deneydir. Kuantum silici, tek parçacıklı kuantum fizikinde tuhaf olan her şeyi tek bir deneyde kapsar: parçacık-dalga ikilemi, superpozisyon durumları ve ölçümün etkin niteliği. Kuantum siliciyi anlarsanız kuantum fizikinin temel unsurlarını anlamışsınız demektir.

Yıllar içinde kuantum silici deneylerinin birçok farklı biçimi yapılmıştır, ama bu deneylerin en basiti Young'ın çift yarık deneyinin bir biçimiyle başlar. Bir çift dar yarıktan bir foton huzmesi gönderilecek olursak yarıkların öbür tarafında belli noktalarda tespit edilmiş tek tek fotonlardan oluşan (sonraki sayfada şekilde gösterildiği gibi) bir girişim örüntüsü görürüz. Bu örüntüyü, ancak ışık aynı anda her iki yarıktan birden geçtiği için görebiliriz. Yarıklardan birini kapatırsak girişim örüntüsü kaybolur: biz de ışığın kapatılmamış yarıktan geçmesi sonucu fotonların genliği bir alana dağıldığını görürüz.

Gördüğümüz girişim örüntüsü, fotonların bir superpozisyon durumunda olduğunu gösterir. Fotonların her birini bekleven dalga fonksiyonunun iki kısmı vardır, biri sol yarıktan geçen foton, diğeri de sağ yarıktan geçen foton içindir. Fotonların her biri aynı anda iki yarıktan da geçmiştir, gördüğümüz örüntüyü oluşturan da bu iki bileşen arasındaki girişimdir. Elinizde iki kısımdan oluşan dalga fonksiyonları varsa her zaman girişim örüntüsü oluşur. Yarıklardan birini kapattığımızda sadece tek kısımlı bir dalga fonksiyonumuz olur; superpozisyon bozulmuş olur ve girişim örüntüsü de olmaz.

7- Scientific American'in Nisan 2007 sayısında evde bir lazer kalemi alu-  
minyum folyo, tel, birkaç parça ucuz polarize edici film kullanarak yapabileceğiniz bir kuantum silici deneyi anlatılmıştır.



Tek tek fotonların oluşturduğu girişim örüntüsü. Soldan sağa 1/30 saniye, 1 saniye, 100 saniye. Princeton Üniversitesi'nden Lyman Page'in görüntüleri kendisinin izniyle yayınlanmıştır.



"Bir dakika, ben girişim iki farklı foton arasında sanıyordum sol yaraktan geçenle sağ yaraktan geçen arasında, öyle değil mi?"

"Böyle düşünmek kolay, çünkü genellikle aynı anda çok sayıda foton göndeririz. Ama meselenin böyle olmadığını varlıklara bir seferde bir foton göndererek gösterebiliriz.

"İyi de tek bir foton nasıl girişim örüntüsü oluşturur ki?"

"Oluşturmaz. Tek tek her foton perdede belli bir konumda tek bir nokta olarak belirir, tek tek fotonların nerede belirceği rastgeledir."

"Yine şu olasılık meselesi."

"Aynen öyle. Tek tek fotonlar rastgeledir, ama deneyi tekrar tekrar yaparsan, bütün fotonların izini sürersen birbirlerine ek lenip bir girişim örüntüsü oluşturduklarını görürsün. Bazı verilerde tek bir foton bulursun, bazı verilerde foton bulma şansın kesinlikle yoktur. Genel örüntü kendisiyle giren tek tek her fotonun dalga fonksiyonundan aldığı olasılık dağılımıyla belirir."

nir."

"Yanı tek bir parçacık, ama iki yarıktan da geçiyor, sonra öbür tarafta tek bir yerde beliniyor, öyle mi?"

"Kesinlikle."

"Bu çok tuhaf."

"Kuantum fizigi bu."

Ama yarıkların birini kapatmak yerine iki yarığı da biri dikey öbürü yatay farklı polarize edici filtrelerle kapattığımızı düşünelim. Sol yarığa sadece yatay polarize olmuş ışığın geçeceği bir filtre koyalım, sağ yarığa da sadece dikey polarize olmuş ışığın geçeceği bir filtre koyalım. 45 derece açıyla dikey polarize edilmiş ışık gönderirsek ışığın yatay polarize edici filtreden geçme olasılığı da dikey polarize edici filtreden geçme olasılığı yüzde 50'dir, dolayısıyla yarıkların her birinden ışık geçer.

Filtrelerin bu biçimde düzenlenmesi, ışığın hangi yarıktan geçtiğini ölçmenin bir yolunu sunar. Detektörümüzün önüne dikey bir polarize edici koyarsak sadece sağdaki yarıktan geçen ışığı görürüz, yatay polarize edici koyarsak sadece soldaki yarıktan geçen ışığı görürüz. Detektörün önündeki polarize edici bize fotonun hangi yarıktan geçtiğini söyler, sanki yarığın yanına bir detektör koymuşuz ve konumu doğrudan ölçmüşüz gibi.

Bunu yaptığımızda ne olur? Yarıkların önündeki filtrelerle ışığa baktığımızda girişim örüntüsüne dair bir emare görmeyiz. Işığın polarizasyonunu ölçtüğümüzde ışığın hangi yarıktan geçtiğini ölçeriz, bu da bizi bir girişim örüntüsü yaratan iki kısımlı dalga fonksiyonundan alıp girişim örüntüsü yaratmayan tek kısımlı dalga fonksiyonuna getirir. Fotonun hangi yarıktan geçtiğini ölçmek dalga fonksiyonunda, fotonun diğer yarıktan geçişini betimleyen kısmı ortadan kaldırır, tıpkı kutulardan birini açmamın, dalga fonksiyonunda, ödülün diğer kutuda olmasını betimleyen kısmı ortadan kaldırması gibi.

Detektöre polarize edici filtre takmamıza bile gerek yok.

ların üzerine polarize ediciler koyarak fotonların her birini "işaretlemiş" oluruz, her fotonun hangi yarıktan geçtiğini ölçebilecek olmamız örüntüyü ortadan kaldırmaya yeter. Kutudaki ödül örneğinde, bu, içinde ödül olan kutunun üstüne birinin "ödül" yazmasına benzer, superpozisyonu ortadan kaldırmak için kutuyu açmamıza artık gerek yoktur.

Örüntünün ortadan kalkması başlı başına tuhaf bir şeydir, ama işler daha da tuhaflaşır: Yarıkların ardından çıkan ışığa bakmak için yatay ya da dikey polarize edici yerine 45 derece açılı bir polarize edici kullanarak ölçümü geri alabiliriz. Böyle yaparsak yeniden girişim örüntüsü görürüz! 45 derece açılı polarize edici ya yatay ya da dikey polarizasyonu geçirecektir, her birinin olasılığı yüzde 50'dir, bu da polarize edicinin ardında tespit ettiğimiz ışığın iki yarıktan birinden ya da yarıkların ikisinden birden geçmiş olabileceği anlamına gelir. Bu üçüncü filtre fotonu işaretleyerek edindiğimiz bilgiyi "siler", tıpkı birinin ödülün bulunduğu kutunun üzerindeki etiketi kaldırması gibi. Fazladan polarize edicinin işe dahil edilmesi sonucu, sanki ölçümü hiç yapmamış gibi oluruz. Dalga fonksiyonunun ikinci kısmı ortadan kaldırılmış olur ve girişimi görebiliriz.

Kuantum silici deneyi, kuantum mekanığının kilit ilkeleriyle ilgili tuhaf olan ne varsa kapsar. Fotonların her biri aynı anda iki yarıktan birden geçerken girişim örüntüsünün belirmesi, kuantum durumlarının superpozisyonunu gösterir, polarize edici filtreler koyduğumuzda girişim örüntüsünün kaybolması ve yeniden belirmesi de kuantum ölçümünün etkin niteliğini gösterir. Tıpkı, parçacığın hangi yarıktan geçtiğini ölçebilmemizin deneyin sonuçlarını tümüyle değiştirmek için yeterli olması gibi.



## Gördüğün Şey Olan Her Şeydir: Kopenhag Yorumu

Bu dört fikir dalga fonksiyonları, izinli durumlar, olasılık ve ölçüm kuantum kuramının merkezi unsurlarıdır. Fotonlarla yapılan deneylerde gördüğümüz girişim örüntüleri, kuantum parçacıklarının gerçekten de aynı anda birçok durumda bulunduğunu doğrulamaktadır. Kuantum sıfırı deneyinde girişim örüntüsünün ortadan kaybolup yeniden belirmesi, ölçümün etkin bir süreç olduğunu sonraki deneylerde neler olacağını belirlediğini doğrulamaktadır.

Fakat yine de bir problemimiz vardır, çünkü bir olasılıktan bir ölçümün sonucuna nasıl geçileceğini betimleyen matematiksel bir süreç yoktur. Fiziksel bir nesnenin izinli durumlarının dalga fonksiyonlarını hesaplamak için Schrodinger denklemini kullanırız, olasılık dağılımını hesaplamak için dalga fonksiyonunu kullanırız ama tek bir ölçümün kesin sonucu öngörmek için olasılık dağılımını kullanamayız. Bir ölçüm yapma sürecinde gizemli bir şey olur.

"Ölçüm problemi", kuantum mekanığına dair birbirleriyle çelişen yorumların kökeninde fiziksel felsefe olmaya zorlandığı noktada yatar. Tekrarlanan ölçümlerin sonuçlarının olasılıklarını hesaplamak için bütün yorumlar aynı yöntemleri kullanır. Birbirlerinden ayrı düştükleri tek nokta dalga fonksiyonunun aynı anda iki (ya da daha fazla) halden oluştuğu durumdur, yani kuantum superpozisyonu halinin bir adım ötesine, nesnenin sadece ve sadece bir tek halde bulunmasına, tek bir ölçümün verdiği klasik sonuca nasıl geçildiğine getirdikleri açıklamalardır.

Kuantum kuramı için ileri sürülen ilk yorum Niels Bohr ve

Danimarka'da görev yaptığı enstitüdeki çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir, bu yüzden Kopenhag yorumu olarak bilinir. Kopenhag yorumu kuantum mekanığında ölçüm problemini tek tek vakalar bazında ele alan bir yaklaşımdır. (Kimi vonleriyle Bohr'un yaklaşımının tipik bir örneğidir<sup>9</sup>)

Kopenhag yorumu makroskobik ve mikroskobik fizik arasında katı bir sınır çizerek superpozisyon ve ölçüm sorunlarından kaçınmaya çalışır. Mikroskobik nesneler; fotonlar, elektronlar, atomlar ve moleküller kuantum mekanığı kurallarının hukmu altındadır, ama makroskobik nesneler, yani kopekler, fizikçiler, ölçüm aletleri klasik fizik hukmu altındadır. İkisi arasında mutlak bir ayrım vardır, makroskobik bir nesnenin bir kuantum tarzında davrandığını göremezsiniz.

Kuantum ölçümü, makroskobik ölçüm aygıtının mikroskobik bir nesneyle etkileşimini gerektirir ve bu etkileşim mikroskobik nesnenin durumunu değiştirir. Buna getirilen olağan tanım, dalga fonksiyonunun tek bir duruma "çöktüğüdür." Kopenhag yorumuna göre bu "çokma", dalga fonksiyonunun birçok olası ölçüm sonucunun bulunduğu yayılmış bir kuantum halindeyken fışıl dönüp değişip ölçülen tek bir değeri bulduğu bir durum almasıdır.

Kopenhag yorumunun en uç biçimlerinde, çoklu makroskobik bir ölçüm aygıtı gerektirmekle kalmaz, ölçümü not alacak bilinçli bir gözlemcinin varlığını da gerektirir. Bu bakış açısına göre

9- Son bölümde söylediğimiz üzere Bohr'un fizige ilk büyük katkısı, basit hidrojen kuantum modeli olmuştur. Bu model kuantum ve klasik fizik fikirlerinin hiçbir net açıklama olmaksızın bir araya getirilmiş ve bir şekilde doğru sonucu veren bir harmanıydı. Bohr'u bunu ideri sürmeve itenin ne olduğu da belirsizdir. Gelgelelim bu model bu kitapta tartıştığımız modern kuantum kuramına giden yolu göstermiştir.

10- "Çöküş" kelimesi Kopenhag tipi yorumlarla kuvvetli bir ilişki içinde olmuştur. Çok bileşenli bir dalga fonksiyonunun tek bir ölçüm sonucuna varması problemiyle ilgili dalga fonksiyonunda fiziksel bir değişimi öngörmeyen başka yaklaşımlar da vardır. Bu "çoklu" yorumların en bilinen örneğini dördüncü bölümde göreceğiz.

30  
bir ormanda devrilen bir ağaç, biri (ya da bir köpek) gelip onun  
düşüğünü gözleyinceye kadar aslında düşmemiştir.

"Bir dakika, dur bakalım, bu nesnel fiziksel gerçeklik fikrini  
reddetmek anlamına gelmiyor mu?"

"En aşırı biçimleriyle evet Werner Heisenberg herhalde Ko-  
penhag şurekâsının en radikal ismiydi ve elektronların bağımsız  
bir gerçekliği olduğundan bahsetmenin bir hata olduğunda kuv-  
vetle ısrar ediyordu Heisenberg'in bakış açısına göre hakkında  
gerçekten konuşabileceğimiz şeyler yalnızca özel ölçümlerin so-  
nuçlarıdır. Ölçümler arasında elektronların ne yaptığından bah-  
setme fikrini reddediyordu."

"Hmm Bu da çok radikalmiş Sanırım bundan hoşlanma-  
dım."

"Yalnız değilsin, inan bana."

Kopenhag yorumu birçok sorun doğurur; bunlardan biri de  
mikroskobik ve makroskobik fizik arasında mutlak bir ayırım  
yapmak için belirgin bir sebep olmamasıdır. Daha önce de gör-  
düğümüz gibi, nesneler daha büyük ve daha karmaşıklarken  
kuantum davranışlarını tespit etmek zorlaşsa da biraz daha bu-  
yük moleküllerde dalga davranışını görmek yine de mümkündür  
Makroskobik nesnelerin, kuantum dalga fonksiyonları ve kuan-  
tum kurallarıyla tanımlanabilmesi gerekir.

Başka bir sorun da dalga fonksiyonunun çökmesiyle ilgili ola-  
rak neyin ya da kımın "gözlemci" sayılacağıdır. Ölçümün gerçek-  
ten "geçerli olması" için birinin ölçüm sonucunu gözlemesinin  
gerekmesi, "bilinçliliğe" bir tür mistik nitelik atfediyormuş gibi  
görülmektedir, bu fikir de birçok fizikçiyi rahatsız eder.

"Çöküş" fikrinin kendisi bile sorunludur. Çöküşü betimleye-  
cek bir matematiksel formül yoktur: bir dalga fonksiyonunun öl-  
çümler arasında nasıl değiştiğini betimlemek için Schrödinger  
denklemini kullanabilirsiniz, ama "çöküş" sürecini betimleme-

nın bir yolu yoktur. Tek yapabileceğiniz bir sonuç seçmek ve ölçüm sonrasında yeni bir dalga fonksiyonuyla baştan başlamak. Birçok fizikçi bunu, insanın içini rahatlatamayacak kadar büyüklü bulur.

Kopenhag yorumundaki sorunların en meşhur örnekleri, şu ünlü "Schrödinger'in Kedisi" düşünce deneyi ve onun ardından gelen "Wigner'in dostu" düşünce deneyidir. Erwin Schrödinger, kuantum kuramının yaratılmasında oynadığı role rağmen, tıpkı Einstein gibi kuramın yorumlarıyla ilgili derin felsefi sorunlar yaşıyordu ve alana hepten yabancılaşmıştı. Denkleminde hiç tartışmasız daha meşhur olan Schrödinger'in kedisi, fizikçinin Kopenhag yorumunun saçmalığını göstermeye çalıştığı şeytanca bir düşünce deneyidir. Schrödinger, içinde bir saat içinde yüzde 50 bozunma olasılığı olan radyoaktif bir atomun ve atomun bozunması halinde zehir salacak bir aygıtın bulunduğu kapalı bir kutuya bir kedi yerleştirdiğini düşünmüştü. Bir saat sonra kedinin hali ne olur diye soruyordu.

Schrödinger'in dikkat çektiği üzere Kopenhag yorumuna göre, kediye betimleyen dalga fonksiyonunda eşit oranlarda "diri" ve "ölü" kısımları olacaktı. Bu durum, deneyi yapan kişi kutuyu açıncaya kadar sürecek; kutu açıldığında kedi iki halden birine çökecekti.<sup>11</sup> Ama bu tümüyle saçma görünüyordu, bir kedinin aynı anda hem ölü hem diri olması fikri uçuktu. Gelgelelim fotonlar açısından oluyormuş gibi görünen şey tam da budur.

Kopenhag yorumu, bir ölçüm yapıncaya kadar fiziksel gerçekliğin var olmadığını soyluyormuş gibi de görünür, bu da kendine özgü felsefi sorunlar doğurur. Eugene Wigner kedi deneyine

11- Ya da İngiliz yazar Terry Pratchett'in *Lords and Ladies* adlı romanında gayet sevimli bir kediye uyarlayarak betimlediği üzere: "Teknik olarak bir kutuya kilitlenmiş bir kedi diri de olabilir ölü de. Bakıncaya kadar bilemezsiniz. Aslında kutuyu açma eylemi kedinin durumunu belirleyecektir, ama bu durumda kedinin olabileceği üç durum vardır: Diri, Ölü ve Kafayı Yemiş." (Harper, s. 226)



bir katman daha ekleyip denevin neler olduğunu kendisine daha sonra anlatan bir dost tarafından yapıldığını düşünerek bu soruyu öne çıkarmıştır. Wigner dalga fonksiyonunun ne zaman çokluğunu sormuştur. Dostu kutuyu açtığında mı yoksa daha sonra Wigner sonucu duyduğunda mı? Ormandaki bir ağaç kopmuş siz ağacın devrildiğini söylemeden önce gerçekten devrilmiş midir?

Kopenhag yorumunun bu sorulara verdiği cevapların hiçbirini felsefi olarak tatmin edici değildir. Kuantum mekaniği mikroskobik nesnelerin ve nesne topluluklarının davranışlarını betimleme konusunda dikkat çekici bir iş çıkarsa da gördüğümüz dünyaya inatçı, çıldırtıcı bir klasiklik gösterir. Basit kuantum nesnelerinden gündelik nesnelerin daha büyük dünyasına geçerken gizemli bir şey olur. Mikroskobik ile makroskobik arasında mutlak bir ayrıma gidilmesinde ısrar eden Kopenhag yaklaşımı, sorudan kaçtığı gerekçesiyle birçok fizikçiyi çarpmıştır. Ne olduğunu söyler, ama nedenini söylemez.

Kuantumdan klasiğe geçişin en iyi nasıl ele alınabileceği canlı tartışmalara konu olmaya sürdürmektedir. Gelecekteki bir kurgam, bir kuantum nesnesini ölçtüğümüzde tam olarak ne olduğuna dair ayrıntılı bir anlayışa yol açabilir. O zamana kadar kuantum mekaniğinin çeşitli yorumlarından birine bağlanacağız.

"Bu yorumu da pek sevdiğimi sanmıyorum. Fazlasıyla tekbenli, değil mi?"

"Yalnız değilsin. Bugünlerde Kopenhag yorumundan gelecekten memnun olan pek fazla fizikçi yok."

"Peki, sen hangi yorumu beğeniyorsun?"

"Ben mi? Ben çenemi kapa hesapla yorumuna meylediyorum. Bu yorumun ismi babasının Richard Feynman olduğu söyleni-

12 Feynman yirminci yüzyılın ikinci yarısında bir fizikçinin edebileceği bütün zekice lafların sahibi olarak görülür. Ama çenemi kapa hesapla muhtemelen ona ait değen matbu olarak ilk kez David Mermin'in

yor bazen, ama ana fikri düşünmekten kaçınmaktır. Kuantum mekanığı bize deneylerin sonuçlarını hesaplamak için çok iyi araçlar sunar, ölçüm sırasında ne olduğu sorusunun felsefele hırakılması da herhalde daha iyi olur."

"Bunu da pek beğenmedim. Parmaklar olmadan hesap makinesiyle çalışmak zor."

"Eh, her türden farklı yorum mevcut; çoğul dünyalar yorum var, David Bohm'un yerel olmayan mekanığı var, 'işlemsel yorum' denilen bir şey var. Kuantum mekanığının, kuantum mekanığı üzerine derin düşünen insan sayısı kadar yorumu var neredeyse."

"Çoğul dünyalar yorumu beğendim. Bundan bahsetmelisin."

"İyi fikir. Bir sonraki bölüm."

"Biliyordum."

#### IV

### Çok Dünya Çok Ödül: Çoğul Dünyalar Yorumu



Bilgisayarın başında oturmuş bir şeyler yazıyordum ki Emmy ayaklarımın dibinde bitiverdi. Bir de baktım ayaklarımın etrafını, yer kokluyor.

"Ne yapıyorsun sen orada?"

"Biftek arıyorum!" diyor kuyruğunu umutla sallayarak

"Orada biftek olmadığına gayet eminim," diyorum "Bilgisayar başında hiç biftek yemedim ve tabii ki yere de hiç düşürmedim "

"Başka bir evrende düşürdün," diyor hâlâ koklayarak.

İçimi çekiyorum. "O küçük köpek beynin şimdi hangi abes kuramla iştiğal ediyor acaba?"

"Eh, bilgisayar başında biftek yemen mümkün, değil mi?"

"Evet, biftek yerim, bazen de bilgisayar başında yerim, evet, elbette."

"Bilgisayar başında biftek yemiş olsaydın yere de muhtemelen bir parça düşürmüş olurdun "

"Bilmiyorum, acaba düşürür muydum?"

"Moruk, seni yerken gördüm " Evet, köpek bana "moruk" diyor llerde terbiye dersi aldırabilirim

"Peki tamam, o olasılığı tanıyalım."

"İşte bu yüzden de yere bİstek düşürmüş olman mümkün. Everett'in çoğul dünyalar kuantum mekanığı yorumuna göre de bu yere bİstek düşürdüğün anlamına gelir. Demek ki yapmam gereken tek şey onu bulmak."

"Teknik olarak, çoğul dünyalar yorumu, evrenin tek taraflı evrilen dalga fonksiyonunda benim yere bİstek düşürdüğüm bir kol olduğunu söyler."

"Hmm. Evet Doğru Yanı benim tek taraflı her ne karın ağrısıysa onu bulmam lazım."

"Ama mesele şu ki dalga fonksiyonunun bir tek kolunu algılayabiliyoruz."

"Belki sen sadece bir kolunu algılayabiliyorsun. Benim burnum çok ıyıdır. Fazladan boyutları koklayarak bulabilirim. Kötü sincaplarla dolu boyutlar Keçi sakallılarla."

"O Uzay Yolu, bilim değil, hem sonra fazladan boyutlar tuumuyle farklı bir şey. Çoğul dünyalar yorumunda, dalga fonksiyonunun kolları arasında yeterince uyum bozulması olduysa fonksiyonun farklı kısımları arasında girişim olması hiç olası değildir, birbirinden kesinlikle ayrılmış, birbirine kesinlikle açılmayan evrenlerdir."

"Uyum bozulması derken ne demek istiyorsun?"

"Diyelim ki burada bir parça bİstek var, sallama kuyrugunu, varsayımsal bir bİstekten bahsediyorum, kuantum mekanığı, bu bİsteğı yere düşürür sonra kaldırıp alırsam düşen bİstek parçasını benimleyen dalga fonksiyonu ile düşmeyen bİstek parçasını benimleyen dalga fonksiyonu arasında bir girişim olabileceğini söyler. Tabii ki düşürmem yalnızca bir olasılık olduğundan fonksiyonun bu iki parçasına da gerek vardır."

"Ne demek istiyorsun?"

"Bunun nasıl görüneceğinden hiç emin değilim. Bak, aslında mesele şu ki bu hiç önemli değil. Bİstek sürekli çevresiyle etkile-



şım halindedir, havayla, masayla, yerle . "

"Kopekle"

"Her neyse Bu etkileşimler esasen rastgeledir ve ölçülmemiştir. Bifteğin farklı parçalarında dalga fonksiyonlarında değişikliklere neden olurlar, bu değişiklikler de dalga fonksiyonlarının aruk hiç girişmemesine neden olur. Bu sürece uyum bozulması denir ve çok hızlı gerçekleşir "

"Ne kadar hızlı?" diye soruyor umutla.

"Tam olarak duruma bağlı ama kabaca bir tahminle muhtemelen 10 " saniye ya da daha az bir surede "

"Ha " Biraz sonuyor "Eh, bu çok hızlıymış "

"Öyle Uyum bozulması gerçekleştiğinde de dalga fonksiyonunun farklı kolları artık birbirleriyle etkileşim kuramaz. Bu da aslında, farklı kolların birbirlerine hiçbir şekilde ulaşamayan, açılamayan, tamamen ayrı evrenler haline gelmesi demektir. Diğer "evrenler"de olan şeyler bizim evrenimizde olup bitenleri kesinlikle etkilemez "

"Adı her neyse onun neden yalnızca bir kolunu görüyoruz?"

"Ah, işte büyük soru Kimse gerçekten bilmiyor. Bazıları bunun, kuantum mekanığının aslında eksik olduğu anlamına geldiği görüşünde, kuantum kuramının temelleri ve yorumlarıyla ilgili araştırmalar yapan koca bir bilim insanları camiası var. Önemli olan şu ki bu evrende masamın altında bifttek bulman hiçbir şekilde mümkün değil, o yüzden lütfen oradan çık."

"Ah. Peki." Masamın altından çıkıyor, başı önünde, kuyruğu sarkmış.

"Hey, ışın aydınlık tarafına bak," diyorum. "Benim bir versiyonumun yere bir parça bifttek düşürdüğü evrende, senin de bir versiyonun var "

"Öyle mi?" Başını dikiyor

"Öyle ya Hem sen becerikli bir avcısın, muhtemelen ben yerden kaldıramadan biftteği alırsın

"Ya" kuvvetini sallamaya başlıyor.

"Ya yani biletini düşürdüğüm evrende, sen onu mutlaka yer-

"Ooo" kuvvetini çilginca sallıyor "Bayılırım biletine"

"Bilirim bayılırım" Üzerinde çalıştığım belgeyi kaydediyor-

am "Bak ne diyeceğim? Hadi yuruyuşe çıkalım, ne dersin?"

"Ooo İy fikir" Fırılıyor, arka kapıya ve tasmaya giden basamaklardan iniyor.

Önceki bölümde tartıştığımız Kopenhag yorumundan pek az farklı tam anlamıyla memnundur. Her biri kuantum ölçümü problemiyle uğraşmanın daha tatmin edici bir yolunu bulmaya çalışan çok sayıda alternatif yorum ileri sürülmüştür. Bu yorumların en ardusu, genel olarak çoğul dünyalar yorumu olarak bilinen olasılıkların gördüğümüz evrende olduğundan farklı bir yol izlediği gerekirse sonsuz sayıda evrenin varlığını öngörmesi sayesinde fizikçiler arasında değilse de pop kültürde baskın bir konuma geçmiş bir yorumdur bu. Muhteşem bir bilim kurgu fikridir kitaplarda filmlerde karşımıza çıkar, U'zay Yolu'nun, keçi satan bir tucul bir Spock'un bulunduğu meşhur bölümünde olduğu gibi.

Bu bölümde çoğul dünyalar yorumundan ve bu yorumun Kopenhag yorumunun doğurduğu bazı sorunları nasıl ele aldığından bahsedeceğiz. Ayrıca ortamla nesne arasında dalgalanan dalga fonksiyonunun farklı kısımları arasındaki girişim etkilerini gölgelediği, "uyum bozulması" (decoherence/zıtlık) olarak bilinen fiziksel süreci tartışacağız. Uyum bozulması kuantum mekanığının modern kavranışı açısından merkezi konudur. Kuantum fiziksinin mikroskobik dünyasından günlük nesnelerin klasik dünyasına geçişi anlamakta kritik bir et-

Son  
Kopenhag

... yorumunun en azın  
... en azı anırsu, bir n  
... matematiksel  
... denklemi, ölçüm  
... hesaplamayı mür  
... ande norma  
... denklemin dah  
... olduğunu so  
... yorumunun te  
... ile makros  
... "dalga fon  
... çünkü  
... ek bir tutarlı  
... dalga fonks  
... hatı  
... anlatır  
... müc  
... insana  
... özellikle  
... hesaplam  
... dünyayı  
... kuantum kura  
... geneni ka  
... bir açıkla  
... birata birat

## Sonra Bir Ölçüm Ortaya Çıkar: Kopenhag Yorumunun Sorunları

Kopenhag yorumunun en azından bir tek fizikçi için açık arayla en rahatsız edici unsuru, bir niceliği ölçtüğünüzde neler olduğunu betimleyen matematiksel bir prosedurdan yoksun olmasıdır. Schrödinger denklemi, ölçümler arasında dalga fonksiyonuna ne olduğunu hesaplamamızı mümkün kılar, ama Kopenhag yorumu, ölçüm yapıldığı anda normal fizığın durduğunu, bilinen hiçbir matematiksel denklemin dahil olmadığı bir şekilde, tek bir sonucu seçen bir şey olduğunu söyler.

Kopenhag yorumunun tek tek vakaları dikkate alan niteliği, mikroskobik fizik ile makroskobik fizik arasında yaptığı keyfi ayırım ve o gizemli "dalga fonksiyonu çöküşü" muazzam derecede rahatsız edicidir; çünkü modern kuramsal fizığın bütün projesi dünyanın tek bir tutarlı matematiksel tanımını bulmaktır. Şu açıklanamayan dalga fonksiyonu çöküşü süreci, Sidney Harris'in meşhur karikatürünü hatırlatıyor: Bir bilim insanı bir problemin ikinci adımını anlatırken "Sonra bir mucize olur" diye yazar. Normal bilimde mucizelere yer yoktur, Kopenhag yorumunun çöküş fikri de insana rahat vermeyecek kadar mucizevidir.

Çogu fizikçi (özellikle de deneyçiler) dalga fonksiyonunun çökmesi fikrini, hesaplamayla ilgili kestirme bir yol olarak kullanmaya, fiziksel dünyayı tahmin edip ölçme işine devam etmeye razıdır; kuantum kuramı fiziksel dünya için şaşırtıcı derecede iyi işler. Bu "çenemi kapa hesapla" yorumunda, kuantum ölçümü için tutarlı bir açıklama bulma problemi felsefecilerin uğraşması için bir kenara bırakılır. Nihayetinde daha iyi bir kuram ortaya çıkabilir; ama o zamana kadar elimizdekiyle yapabileceklerimizi yapmamız gerekir. (Anlaşılan yapabileceklerimiz de epeyce fazladır.)

Ölçümün niteliği, kuantum kuramının ilk günlerinden beri

bir problem olmuştur, birkaç fizikçi de her zaman bu meseleler üzerine daha derin düşünmeyi tercih etmiştir. Bu fizikçilerin bir çoğuna göre, dalga fonksiyonunun "çökmesi" ne net bir açıklama getirmemesi, Kopenhag yorumunun temelde kusurlu olduğunu gösterir. Bu yüzden de bu fizikçiler hep alternatif bir yorum aramışlardır.

### Çöküş Yok: Hugh Everett'in Çoğul Dünyalar Yorumu

1957'de, Princeton'da Hugh Everett III adlı bir yüksek lisans öğrencisi, "çöküş" problemine basıtlığıyla nefes kesen bir çözüm önerdi: Everett diyor ki dalga fonksiyonunun çökmesini belirtmeyecek matematiksel bir yöntem olmamasının sebebi dalga fonksiyonunun çökmesi diye bir şeyin olmamasıdır. Dalga fonksiyonu her zaman her yerde Schrödinger denklemine göre gelişir, ama evrenin büyük dalga fonksiyonunun sadece küçük bir parçasını görürüz.

Bunun nasıl işlediğini görebilmek için önceki bölümde verdiğimiz örneğe, kutulara konmuş ödül örneğine geri dönelim. İki kutudan birinde ödül olduğunu düşünelim, Kopenhag yorumunun çizdiği tablo, en başta, ödül için iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonu olduğunu söyler. Bu dalga fonksiyonu zaman içinde Schrödinger denklemine göre değişir. Bir kutuyu açıp kopeğin kutunun içine bakmasına izin verirsek dalga fonksiyonu, ödülün ya soldaki ya sağdaki kutuda bulunmasına bağlı olarak anında ikiye halden birine çöker. Gelecekteki değişiklikleri tahmin çalışmalarına Schrödinger denklemiyle, yani tek parçalı dalga fonksiyonunu kullanarak başlarız.

Everett'in çizdiği tablodayla çöküş yoktur. Dalga fonksiyonu bir superpozisyon durumuyla başlar, ödülün hem soldaki hem



sağdaki kutularda bulunmasına denk gelen, iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonu vardır; kutulardan birini açtığımızda bu süperpozisyon durumu daha da büyür. Artık süperpozisyon sadece ödülü değil, ödülün konumunu ölçen kopeği de içermektedir. Dalga fonksiyonunun kısımlarından biri "sol kutudaki ödül ve ödülün sol kutuda olduğunu bilen bir köpek", diğeri ise "sağ kutudaki ödül ve ödülün sağ kutuda olduğunu bilen bir köpek"tir. Geleceğe doğru ilerledikçe bu süreç devam eder. Deneydeki bir sonraki adım kopeğin ödülü yemesi ya da yememesiyse (bu düşük olasılıklı bir sonuçtur, ama mümkündür), dalga fonksiyonunun dört parçası olur: sol kutudaki ödülü yiyen köpek, sol kutudaki ödülü yemeyen köpek, sağ kutudaki ödülü yiyen köpek, sağ kutudaki ödülü yemeyen köpek.

Karmaşıklıkta bu artış, matematiksel sembollerle gösterildiğinde daha da çarpıcıdır. Sadece ödül için iki kısımlı bir dalga fonksiyonuyla başlamıştık.

$$\Psi_{\text{odul}} = |\text{Sol}\rangle_{\text{odul}} + |\text{Sağ}\rangle_{\text{odul}}$$

Burada, açılı parantezler, ödülün sol ya da sağ kutuda olmasına denk gelen dalga fonksiyonlarını temsil eder. Sonra ise köpek dahil olur:

$$\Psi_{\text{toplam}} = |\text{Sol}\rangle_{\text{odul}} |\text{Sol}\rangle_{\text{köpek}} + |\text{Sağ}\rangle_{\text{odul}} |\text{Sağ}\rangle_{\text{köpek}}$$

Sonra da ödülü yiyip yememe kararı:

$$\Psi_{\text{toplam}} = |\text{Sol}\rangle_{\text{odul}} |\text{Sol}\rangle_{\text{köpek}} |\text{Yer}\rangle + |\text{Sol}\rangle_{\text{odul}} |\text{Sol}\rangle_{\text{köpek}} |\text{Yemez}\rangle + |\text{Sağ}\rangle_{\text{odul}} |\text{Sağ}\rangle_{\text{köpek}} |\text{Yer}\rangle + |\text{Sağ}\rangle_{\text{odul}} |\text{Sağ}\rangle_{\text{köpek}} |\text{Yemez}\rangle$$

Görebileceğiniz gibi, bu iş çok hızla karmaşıklaşıyor, ama gelişimi her zaman Schrödinger denklemiyle betimleniyor.

"Biliyorsun, ben bu denklemlerden pek bir şey anlamıyorum."

"Ayrıntılı olarak anlamın gerekmiyor ki. Dalga fonksiyonunun giderek karmaşıklaşmasını biraz daha somut olarak anlatmak için verilmiş örnekler onlar."

"Yani sadece korkutucu görünmeleri gerekiyor?"

"Fazlasıyla."

"Eh, iyi iş, o halde."



Everett'in çizdiği tablo, hemen bir gelişme gibi görünmez. Gizemli "çöküş" kaldırılmıştır, ama katlanarak büyüyen bir dalga fonksiyonu pahasına. İlk bakışta bu da gerçekliğe aykırıymış gibi görünür, çünkü sistemleri hiç, birden fazla halde görmeyiz. Dalga fonksiyonunun bütün bu fazladan parçaları ortadaysa neden nesneleri aynı anda birden fazla durumdaymışlar gibi algılamıyoruz?

Everett'e göre cevap gözlemciyi dalga fonksiyonundan ayırmayacağımızdır. Gözlemci sistemin geri kalanına dahildir, bileşenler "sol kutudaki ödül ve ödülün sol kutuda olduğunu bilen köpek" gibi şeylerdir. Bunun sonucundan da sadece kendi genel dalga fonksiyonumuzun küçük bir kısmını algılarız. Bu dallanma, Einstein ve diğerlerinin çok sıkıntı veren bulduğu kuantum rastgeleliğinin kökenidir. Dalga fonksiyonu her zaman düz ve sürekli bir biçimde evrilir, ama biz bir seferde dalga fonksiyonunun sadece bir dalını deneyimleriz, hangi dalı gördüğümüz de rastgele bir tercihtir. Kendimizin diğer versiyonları, diğer dallarda var olur, farklı sonuçları deneyimler. (Bu yüzden de bu yoruma bazen "çokul zihinler" yorumu denir.)

Çok sayıda diğer dalların hiçbirinin bizim dalımızdaki olaylar üzerinde tespit edilebilir bir etkisi yoktur, bizim dalımızın da başka dallardaki olaylar üzerinde tespit edilebilir bir etkisi yoktur. Bu diğer dallar, her bakımdan kendi içlerine kapalı, bizim evrenimizden hiçbir şekilde erişilemeyecek paralel evrenlerdir. Bu kurama "çokul dünyalar" yorumu adı verilmesinin kökeninde bu yatar. Sanki her ölçüm yapıldığında evren çatallanır ve sürekli, küçük farklarla değişen tarihleri olan yeni paralel evrenler doğurur.

...kesimi olmay  
...cadi, fakat  
...dalgı for  
...amış. Pel  
...neden  
...paralel evrenle  
...um bozulma  
...birleriyle e  
...um bozulmas  
...menin sonuc  
...günüm olası  
...anin klasik gö  
...am mekaniği  
...herhangi  
...Fakat uyum  
...tanışında oze  
...na bazen "uyu  
...mun neredeyse e  
...bozulması kua  
...kavranışı aç  
...um bozulm  
...ğu hatalı oldu  
...günde istene  
...pratik yorum  
...günümüz süreci

## Dalga Fonksiyonları Düşüyor: Uyum Bozulması

Birbirine etkileşimi olmayan bu dallar çoğul dünyalar yorumunun karşısına ciddi, fakat küçük bir problem çıkarırlar. Gördüğümüz iki parçalı dalga fonksiyonlarının hepsi bir tür girişim fenomenine yol açmıştı. Peki, dalga fonksiyonunun bütün bu fazlardan dalları varsa neden etrafımızda her zaman girişim görmüyoruz? Bu "paralel evrenlerin" kapılarını bize kapatan şey ne?

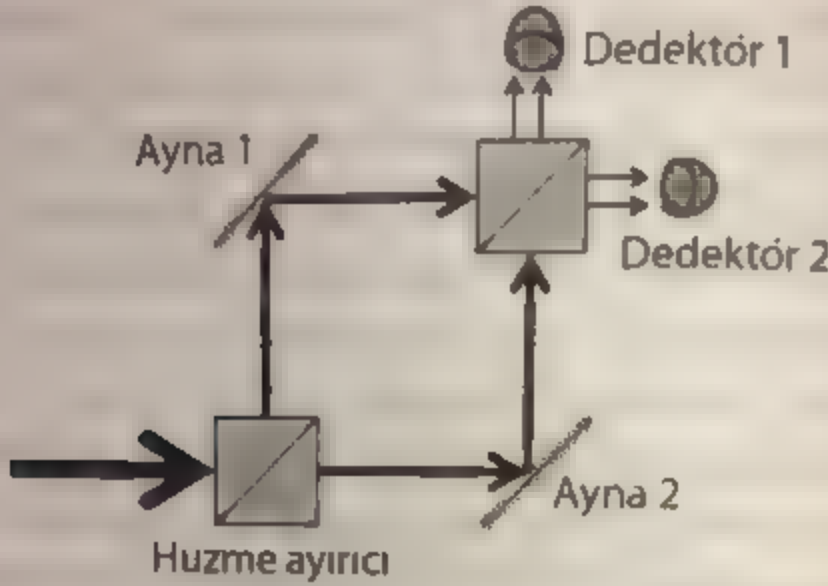
Cevap, uyum bozulması denilen, dalga fonksiyonunun farklı dallarının birbirleriyle etkileşim içine girmesini engelleyen bir süreçtir. Uyum bozulması daha geniş ortamla rastgele dalgalanan etkileşimlerin sonucudur, dalga fonksiyonunun farklı dalları arasında girişim olasılığını ortadan kaldırır ve deneyimlediğimiz dünyanın klasik görünmesini sağlar. Uyum bozulması sadece kuantum mekaniğinin çoğul dünyalar yorumunda ortaya çıkmış değildir, herhangi bir yorumla uyumlu, gerçek bir fiziksel süreçtir.<sup>1</sup> Fakat uyum bozulması, çoğul dünyalar yorumunun modern kavranışında özellikle önemlidir (Sonuçta çoğul dünyalar yorumuna bazen "uyumu bozulmuş tarihler" yorumu da denir, yorumun neredeyse evrenler kadar fazla adı vardır -).

Uyum bozulması kuantum mekaniği ve kuantum yorumlarının modern kavranışı açısından kesinlikle kritik bir önemdedir. Gelgelelim uyum bozulmasına ilişkin bilinen varı klasik açıklamaların çoğu, hatalı oldukları ve genellikle de biraz dogmatik oldukları için gerinde istenen çok şey bırakır. Asıl uyum bozulması

1- Aslında Kopenhag yorumunun yerini almaya aday avakta kalabilir kuantumların hepsi ölçüm sürecinin önemli bir parçası olarak eşyetsiz düşünebilir.

2- "Çoğul dünyalar", "çoğul tarihler", "çoğul zihinler", "uyumu bozulmuş tarihler", "görelî hal formülasyonu" ve "evrensel dalga fonksiyonu kavramı" bunlardan bazılarıdır.

kuramı incelikli, anlaması zor bir kuramdır. Gelgelelim belirsizlik ilkesinde olduğu gibi bu kuramı açmak için biraz çaba sarfetmeye değer; çünkü uyum bozulması evrenin işleyiş biçimine dair çok zengin bir anlayış sunar.



Metinde betimlenen interferometre Soldan giren ışık huzme ayırıcı tarafından iki ayrı yola ayrılır, sonra ikinci bir huzme ayırıcıyla birleştirilir. Ayna 1'e çarpan huzme Ayna 2'ye çarpan huzmeyle aynı mesafeyi kat ediyorsa girişim bütün ışığın yukarıdaki dedektöre (dedektör 1) çarpmasına, sağdaki dedektöre (dedektör 2) hiç ışık çarpmamasına neden olur.

Uyum bozulması fikrini anlayabilmek için basit bir interferometrenin, bir ışık huzmesini ikiye bölen iki huzme ayırıcıdan ve huzmeleri tekrar birleştiren bir çift aynadan oluşan bir aygıtın kullanıldığı somut bir örnek üzerinden gidelim.<sup>3</sup> Bu gibi interferometreler fizikte son derece önemlidir, kuantum etkilerini göstermekle kalmaz, dünyanın en hassas rotasyon, ivme ve kütleçekim dedektörlerinin de temelini oluştururlar. Bunlar fizik deney-

<sup>3</sup> Bu aygıtı onu icat eden Alman ve İsviçreli fizikçilerin adıyla "Mach-Zehnder interferometresi" denir.



lerinde minik kuvvetlerin ölçülmesini mümkün kılar, ayrıca demazaltı seyirleri de uygulama alanları arasında ver alır

Işık huzme ayırıcılardan birine çarptığında interferometreye girer, huzme ayırıcı ışığın yarısını bozmadan geçirir, diğer yarısını ise 90 derecelik bir açıyla yansıtır. Bu iki huzme birbirinden ayrılır, sonra iki ayna kullanılarak yeniden bir araya getirilir ve ikinci bir huzme ayırıcıda yeniden birleştirilir. İkinci huzme ayırıcı öyle yerleştirilmiştir ki ayrılan huzmelerin birinden aktarılan ışık ile diğerinden yansıyan ışık tam olarak aynı yolu izler ve iki detektörden birinin üzerine vurmada önce birbirleriyle girer.

Bu iki detektörün her birinin, ışığın tam olarak yarısını tespit edeceğini, çünkü her birinin, iki yolun her birinden, ilk huzmenin dörtte birini aldığını düşünebilirsiniz ( $1/4 + 1/4 = 1/2$ ). Aslında detektörlerin her biri hiç ışık tespit etmeyebileceği gibi, baştaki huzmeyi bütün yoğunluğuyla da tespit edebilir, çünkü farklı yollar izleyen dalgalar, birinci bölümdeki çift yarık deneyindeki dalgalar gibi birbirleriyle girer.

Baştaki huzmenin ikiye ayrılmasıyla oluşan iki huzmenin izlediği yollar tam olarak aynı uzunlukta olursa iki ışık huzmesi Detektör 2'ye giderken aynı sayıda salınımdan geçer ve yapıcı bir biçimde karışarak ortaya parlak bir nokta çıkarır, interferometreye giren ışığın tamamı bu detektöre çarpar. Öte yandan yolların biri diğerinden ışığın dalga boyunun yarısı kadar uzun olursa bu yoldan geçen ışık fazladan yarım bir salınımdan geçecek ve iki dalga yıkıcı bir şekilde karışacaktır: Ayna 1'e çarpan dalga tepeleri Ayna 2'ye çarpan dalga çukurlarıyla birleşecek ve birbirle-

4- Bir dalga bir huzme ayırıcıya çarptığında fazında küçük bir değişiklik olur sanki yansımış huzme fazladan küçük bir mesafe almış gibi. Sonuçta iki yol aynı uzunlukta olursa, Detektör 2'ye çarpan dalgalar aynı fazda olur ve birbirine eklenip parlak bir nokta meydana getirir, Detektör 1'e gelen dalgalarla zıt fazda olur ve birbirini iptal eder. Farklı uzunluktaki yollar da iki detektör birbirini tamamlayan sinüsler verecektir; biri hiç ışık görmezken, diğeri ilk baştaki huzmenin yoğunluğunu tam olarak tespit eder

nını iptal edecek, Detektör 2 de hiç ışık vermeyecektir. Uzunluk farkını tam bir dalga boyu artırırsak tepeler yine örtüşür ve parlak bir nokta elde ederiz. Bu iki uç arasında, ara miktarlarda ışık elde ederiz. Bu deneyi birçok kereler tekrarlayarak ve bir yolun uzunluğunu hafifçe değiştirerek bir girişim örüntüsü üretebiliriz. Bu da Detektör 2'de parlak nokta, karanlık, parlak nokta karanlık diye değişen bir örüntü ortaya çıkaracaktır.

Detektör 2'ye ne miktarda ışık ulaşacağı yalnızca, ışığın iki yolun her birini ne kadar zamanda aşacağına dayanır. Işığın bu iki koldan yol almasını, birbirinin aynı iki köpeğin bir apartman bloğunun etrafında ters yönlerde yürümesine benzetebiliriz. Köpekler en başta aralarında, karşı köşeye ulaşan ilk köpeğin hangi yola gideceğini seçeceğinde anlaşır. İki köpek aynı hızdaysa ve gittikleri yollar aynı uzunluktaysa, karşı köşeye aynı anda varırlar. Ama yolların biri diğerinden birazcık daha uzunsa o yoldan giden köpek hep daha geç varır ve köpekler bundan sonra, başta anlaştıkları gibi aynı yolu izler.

"Dur bir dakika, kuantum bunun neresinde şimdi? Dalgalar-dan ve köpeklerden bahsediyorsun sen!"

"İnterferometrenin temel işleyişini klasik olarak anlatabilir-sin; ama bir seferde tek bir foton gönderdiğinde de mukemmel işler. Bu sadece kuantum fizikıyla açıklayabileceğin bir sistem."

"Örüntüyü görmek için çok fazla foton gerekmez mi?"

"Kesinlikle. Ama deneyi birçok kereler tekrarlarsan örüntü-yü oluşturursun. Deneyi iki yolun aynı uzunlukta olacağı şekilde kurar da 1000 kere tekrarlarsan detektörlerin birinde 1000 foton görürsün. Sonra aynaların birini bir parça kaydırırsın ve deneyi 1000 kere daha tekrarlarsın, 700 foton görürsün ve böyle devam eder. Bunu tekrar tekrar yaparsan, parlak bir hüzmeyle ortaya çı-kan örüntünün aynısını görürsün."

"Tıpkı benim her gece arka bahçedeki tavşanı takip etmeye çıktığımda konumunu işaretleyerek dalga fonksiyonunu ölçmem

gibi, ha?"

"Teknik olarak sen olasılık dağılımını, bir dalga fonksiyonunun karesini ölçüyorsun, dalga fonksiyonunun kendisini değil, ama evet, temel fikir bu."

"Tavşan büyük olasılıkla kuş yemliğinin altında oluyor "

"Evet, çünkü dökülmüş yemleri yiyor. Konuya döner mısın, lütfen?"

"Peki "

Interferometrenin kuantum tanımına geçecek, ondan tek tek fotonlar ve dalga fonksiyonları açısından bahsedecek olursak foton dalga fonksiyonunun ilk huzme ayırıcıda iki kısma ayrıldığını söyleriz. Popüler çoğul dünyalar yorumunun penceresinden bakınca dalga fonksiyonunun ikinci dalı ilk ortaya çıktığında evrenin de ikiye ayrıldığını söylemek isteyebilirsiniz.

Bu baştan çıkarıcıdır, ama hatalıdır; çünkü dalga fonksiyonunun iki kolu olsa da o noktada "ayrı evrenler" değildirler. Bunu biliyoruz; çünkü ikinci huzme ayırıcıda bu kolları bir araya getirdiğimizde girişimi görüyoruz. Bir fotonun detektörümüze ulaşma olasılığı, interferometredeki yollardan birinin uzunluğunu değiştirdiğimizde değişiyor, bu da iki ayrı yolun birbirini etkilediğini gösteriyor. Foton aynı anda iki yoldan birden gidiyor ve kolları yeniden birleştirdiğimizde kendisiyle girişiyor.

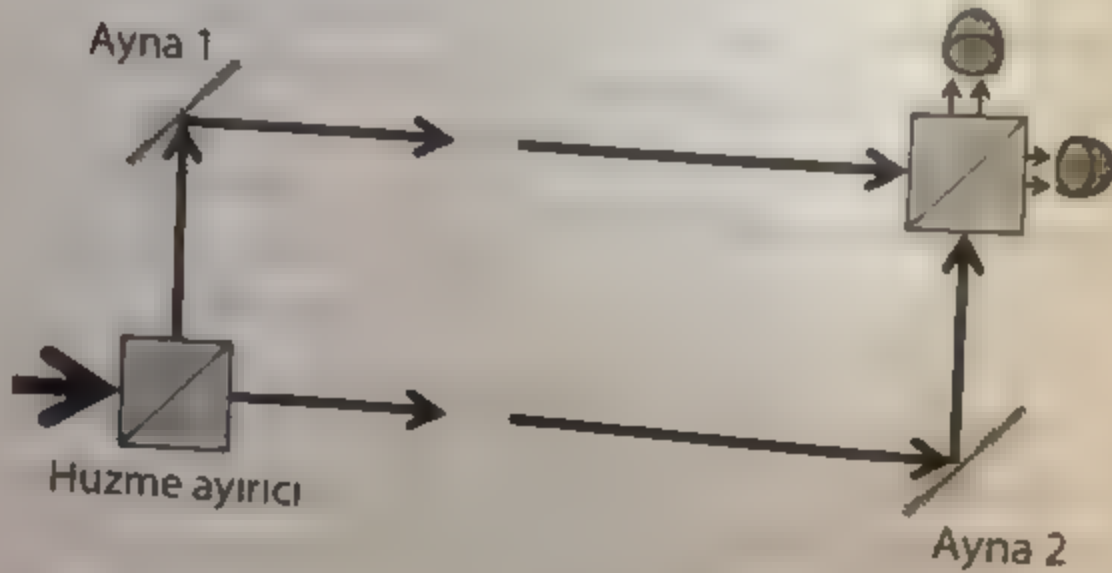
Bu girişim örüntüsünü görüyoruz; çünkü dalga fonksiyonunun iki kısmı "eşevrelilik" (coherence/ eşfazlılık) dediğimiz bir özelliğe sahip. "Eşevrelilik" kaygan bir kelimedir, ama iki dalga fonksiyonunun "eşevrelili" olduğunu söylediğimizde tek bir kaynaktan geliyormuş gibi davrandıklarını anlatmak isteriz.<sup>5</sup> Interferometre örneğinde tek bir kaynaktan gelirler; huzme parçaları-

5- Bu çok kaba bir tanımdır ve her şeyi yakalamaz; örneğin tek bir büyük kaynağın iki karşıt ucundan çıkan dalgalar eşevrelili olmayabilir, ama yine de bu tanım ana fikri aktarır

nin her biri interferometreden geçerken, esasen aynı etkileşimle-  
ri geçirir, böylece bütün yol boyunca eşevreli kalırlar. Girişimin  
eş fazlı ya da zıt fazlı olduğunu belirleyen tek şey, iki yolun uzun-  
ludur.

Dalga fonksiyonunun iki kolunu, iki ayrı evren haline getir-  
mek için bu eş fazlılığı ortadan kaldırmamız gerekir. Eşevreli ik  
almazsa dalga fonksiyonunun iki parçası birbiriyle karışarak tes-  
pit edilebilir bir örüntü ortaya çıkarmaz, bir yolun diğeri üzerin-  
deki etkisini göremeyiz. Foton iki farklı evrende klasik bir parça-  
cık olarak görünecektir, bir evrendeki huzme ayırıcıdan doğrudan  
gececek, diğesinde yansıyacaktır.

Dalga fonksiyonunun iki kolu arasındaki eşevrelilik daha bu-  
yük bir ortamla etkileşim yoluyla ortadan kalkar. Bunun nasıl iş-  
lediğini görmek için interferometreyi çok uzun yaptığımızı dü-  
şünelim, öyle ki huzmelerin iki huzme ayırıcı arasında, havanın  
içinden çok yol geçmesi gereksin:



Huzme ayırıcılar arasında çok uzun bir mesafenin bulundu-  
ğu bir interferometre

Yürüyüşe çıkan köpek örneğinde, bu uzun interferometreyi,



birbirinin avını iki köpeği ters yönlerde Central Park etrafında yürümeye göndermişiz gibi düşünebiliriz. Yolun daha uzun olması, dikkat dağıtan şeylerin de fazlalaşması anlamına gelir, peşinden koşacak sincaplar, yere düşmüş yiyecekler, basılacak at pislikleri. Artık köpekler aynı hızda yol alamaz, karşılarına çıkan şeye bağlı olarak bazen hızlanırlar, bazen yavaşlarlar. İki köpeğin varış noktasına hangi sırayla geleceği, sadece izledikleri yolun uzunluğuna değil, yolda nelerle karşılaştıklarına da bağlıdır.

Aynı şey ışık açısından da geçerlidir. Işık interferometrede yol alırken havayı oluşturan atomlar ve moleküllerle zaman zaman etkileşime geçer. Bir koldan ilerleyen ışık ortalama daha fazla molekulun bulunduğu bir bölgeden geçip yavaşlayabilir ya da molekul sayısının ortalama daha çok daha az olduğu bir bölgeden geçip biraz hızlanabilir. Bu etkiler çok küçüktür, ama yolun uzunluğuna eklenir; tıpkı yuruyuşe çıkan köpeklerin karşılarına çıkan dikkat çekici şeyler gibi. Girişim örüntüsü artık yalnızca iki yolun uzunluğuyla değil, ışık huzmelerinin içinden geçtikleri ortamla, yani havayla etkileşimleriyle de belirlenir.

Ortamla etkileşimler, Central Park çevresindeki dikkat çekici şeyler gibi, temelde rastgeledir ve değişkendir, başka bir deyişle bir yerden diğerine, bir andan diğerine farklılık gösterirler. Bir köpek her gün aynı kaldırımda vere düşürülmüş bir yiyecek bulmayacaktır; bir foton da interferometrenin aynı kısmında her seferinde bir molekulle etkileşime girmeyecektir. Etkileşimler örüntüyü değiştirir ve bu değişiklik de deneyi yaptığımız her seferinde farklı olur. Sonuç; Detektör 2'de ışık görüp görmeyeceğimiz ya da hangi köpeğin yarışı kazanacağı tümüyle rastgeledir, kontrolümüz dışındaki etkenlerle belirlenir.

Bu rastgele etkileşimler sayesinde, iki koldaki ışık dalgaları artık eşevreli olmaz, bu yüzden de onları bir araya getirdiğimizde artık açık bir etkileşim örüntüsü görmeyiz. Onun yerine sürekli değişen, saniyede milyonlarca kere konumu farklılaşan bir örüntü.



tu görürüz. Parlak ve karanlık noktalar iç içe geçip bulanıksan ve örüntüyü siler. Aynı etki, deneyi tek tek fotonlarla yapıp mada da ortaya çıkar, dalga fonksiyonunun iki parçası artık eşevreli değildir. Fotonlar geniş bir ortamla rastgele, değişen etkileşimlerden geçtiğinde girişim örüntüsü zarar görür.

Kuantum etkilerini ortadan kaldıran bu rastgele etkileşimin gerçekleştiği süreç uyum bozulması (decoherence) olarak bilinir. Çünkü foton dalga fonksiyonunun farklı kısımları arasında ki eşevreliliği (coherence) ortadan kaldırır. Uyum bozulması dalga fonksiyonunun farklı kollarının birbirini tespit edilebilir bir biçimde etkilemesini engeller. farklı kolların bir araya gelip de girişim örüntülerini yaratmasını beklesek de bunu görmeyiz. Uyum bozulması yüzünden farklı kollar arasındaki girişim rastgeledir ve bu yüzden de tespit edilemez.

"Yani elimizde birbirleriyle girişmeyen iki farklı foton var ha?"

"Havır, bundan daha ince bir durum var. Elimizde hala bir foton var, ama dalga fonksiyonunun iki farklı kolunda belirliyor. Uyum bozulması yüzünden bir girişim göremiyoruz."

"Kendisiyle girişmeyen tek bir foton, öyle mi?"

"Kendisiyle girişir ama ortamla etkileşimi girişim örüntüsü nu her seferinde farklılaştıran rastgele değişimlere yol açar. Tekrarlanan ölçümlerle bir örüntü ortaya çıkaramayız, çünkü örüntü her seferinde değişir. Örüntü saniyede milyonlarca kere değişir. büyük olasılıkla parlak bir noktayı karanlık nokta olarak alırsınız, bu da her şeyi buluşturup bir..."

"Bir karanlık-parlak arası noktaya mı çevirir?"

"Aynen."

"Kovalamaya çıktığımda tavşanın dalga fonksiyonunu ölçmeye çalışmam, ama bazen tavşan yerine sincapları takip etmiş olmam gibi, ha?"

"Bak, sincaplar da tavşanlar da genellikle kuş yemliğinin altında oluyor, bu yüzden pek fark etmezdi. Daha çok şuna benzi-

her A  
meve çalış  
ce sınıverum.  
Buna kılık der  
götüracağım. Sa  
her biri ken  
cevreli değildir  
ortaya çıkaram  
bir örüntü g  
Sı girişim örün  
klasik parçacık  
ve de bu işte  
kuantum etk  
nemeven bir şey  
nizde 50'sinde, b  
çöstermeyen klasi  
Bunivorum. Bir  
nusu nedir?"  
"Evet, bu çok iyi.  
Teşekkürler, tab  
U  
bazen, uyum bozu  
amalarla karşılaş  
im içine girdiğin  
bir ölçüm

yor. Sen her gece tavşanın konumunu kaydedip dalga fonksiyonunu ölçmeye çalışıyorsun; ama ben kuş yemliğini bahçede farklı yerlere taşıyorum."

"Ah. Buna kılık derler. Sakın yapma."

"Yapmayacağım. Sadece uyum bozulmasının girişim örüntüsünü nasıl sildiğini anlatmak için benzetme yapıyorum. Tek tek fotonların her biri kendisiyle karışsa da dalga fonksiyonunun ıki kısmı eşevreli değildir; bu yüzden de tekrarlanan ölçümlerle bir örüntü ortaya çıkaramayız."

"Ama bir örüntü görmüyorsak girişim olduğunu nasıl bilebiliriz? Bir girişim örüntüsü üretmeyen kuantum parçacıklarıyla sıradan klasik parçacıklar arasındaki fark nedir?"

"Mesele de bu işte. Hiçbir fark yok. Rastgele etkileşimler yüzünden, kuantum etkileri sivaşır ve elimizde girişim örüntüsüne benzemeyen bir şey geçer; girişim her zaman olsa dahi. O zamanın yüzde 50'sinde, bir foton tespit edersen, tıpkı hiç dalga özelliği göstermeyen klasik bir parçacıkmiş gibi."

"Bilmiyorum. Biraz Zenvari değil mi? 'Karışan bir fotonun örüntüsü nedir?'"

"Hey, bu çok ıyı."

"Teşekkürler, tabiatımda Buda olmak da vardır, bilirsın "

## Ortamin Etkisi: Uyum Bozulması ve Ölçüm

Bazen, uyum bozulmasını bir ölçüm süreciymiş gibi anlatan açıklamalarla karşılaşırırsınız; "Bir foton bir hava molekülüyle etkileşim içine girdiğinde, bu, fotonun konumunu ölçmekle aynı şeydir, ölçüm girişim örüntüsünü ortadan kaldırır," gibi şeyler söylenir. Bu gibi açıklamalar neredeyse tam anlamıyla geri açıklamalardır; uyum bozulması, fotonu etkileşimleri sırasında ölçmenin

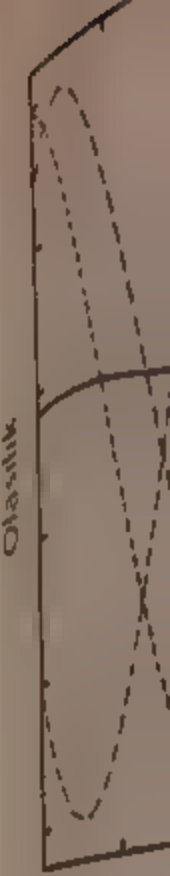
bir sonucu değildir, foton ile çevresi arasındaki etkileşimi ölçme-  
menin bir sonucudur.

Bu incehikli bir noktadır, ama uvum bozulmasıyla ilgili mo-  
dern kavrayışlar açısından kilit önemdedir. Interferometreye tek  
tek fotonlar gönderdiğimizde fotonların her biri kendisiyle gır-  
şır, bu girişim oruntusunun bir dalga fonksiyonu vardır. Binler-  
ce foton gönderirsek her seferinde aynı etkileşim olursa, ölçümü  
tekrar tekrar gerçekleştirip karşı sayfadaki şekilde gösterilen ke-  
sintili çizgili ilk eğriye benzer bir girişim oruntusu çıkarabiliriz.

Fakat her seferinde foton ile çevresi arasında aynı etkileşimi  
garanti edemeyiz, tıpkı Central Park'taki bir turistin, kopekleri-  
miz her yuruyuşe çıktığında aynı noktaya yiyecek düşüreceğini  
garanti edemeyeceğimiz gibi. Sonuçta, gönderilen ikinci foton,  
farklı bir dalga fonksiyonuna göre kendisiyle gırışecektir. Bu de-  
neyi binlerce kez tekrarlayabilirsek şekildeki kesintili çizgili ikin-  
ci eğriye benzer bir oruntunun izini surebiliriz. Üçüncü fotonun  
başka bir dalga fonksiyonu vardır, onun oruntusu de üçüncü eğri  
gibi olur vs.

Sonunda bu öruntülerin ve binlerce başka oruntunun her bi-  
rinde, her biri farklı konumlarda zirve yapan tek bir foton görü-  
rüz. Toplam etki, birçok farklı girişim oruntusunun toplamı olan  
bir oruntunun izini surecek bulunur. Bu da şekilde kesintisiz bir  
çizgiyle gösterilmiştir, neredeyse hiç girişim olmadığını gösterir.

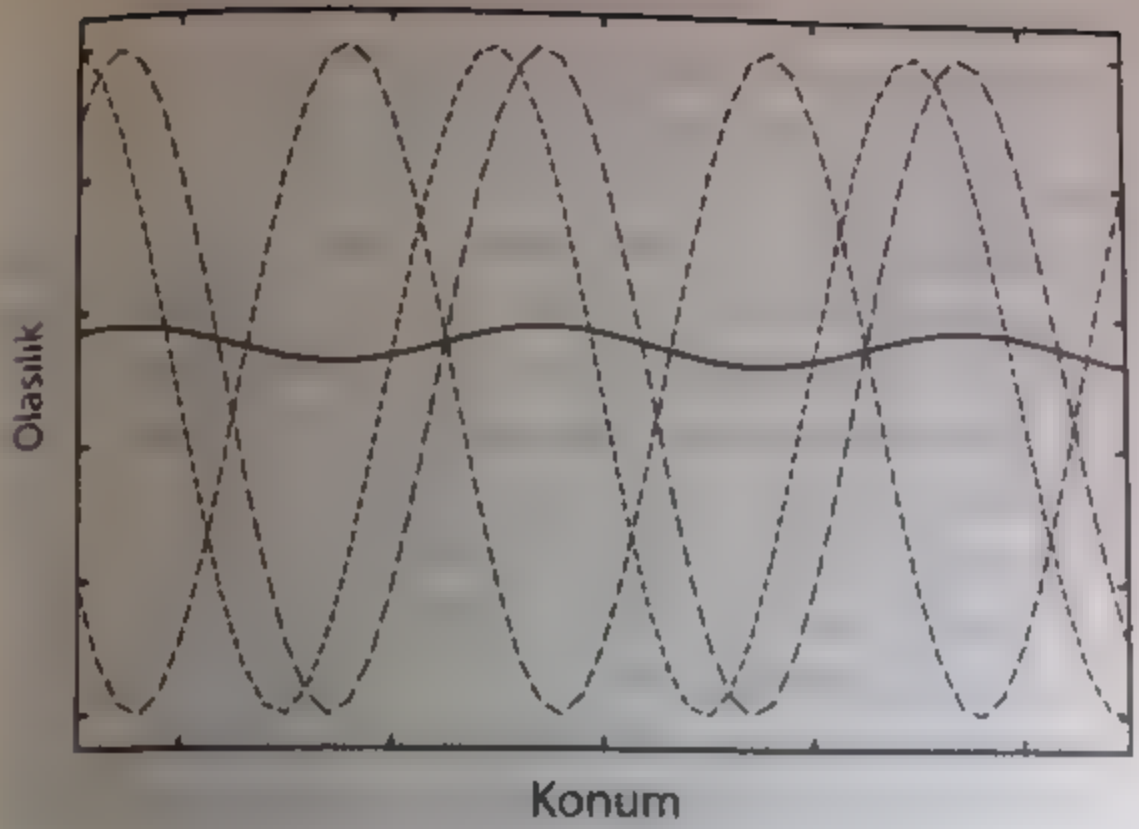
Bunun ortamı, çevreyi ölçmekle ne ilgisi vardır? Gönderdiği-  
miz fotonların her biri havayla etkileşim kurduğunda, ortamın  
durumunda küçük bir değişikliğe yol açar, bir hava molekülü bi-  
raz daha hızlanır ya da yavaşlar ya da molekülün iç hali bir şekil-  
de değişir. Ortama, çevreye tam olarak ne olduğu tam olarak ne  
tür bir etkileşimin gerçekleştiğine bağlıdır, bu da fotona ne oldu-  
ğunu belirler.



Kesintili ç  
leri, m göst  
lamını tem  
sılandığını

Ortama ola  
zotun hava m  
etik bu bilg  
ir dalga fonk  
x emardık Q  
mekler ama  
xıncu verdiğ  
lonla tam ola  
yınra 3674 ur  
amuz sanki h  
nı 1227





Kesintili çizgiler üç farklı fazdaki fotonların girişim örüntülerini gösterir. Kesintisiz çizgi, böyle birkaç örüntünün toplamını temsil eder, girişim örüntüsünün neredeyse tamamen silindiğini gösterir

Ortama olan her şeyin, interferometredeki iki yolda bulunan bütün hava moleküllerinin tam olarak durumlarını belirleyebilseniz bu bilgiyi fotona ne olduğunu incelemek için kullanabilir, dalga fonksiyonları aynı örüntüleri üreten fotonlara bakmayı seçebiliriz. Çok çok az sayıda foton tam olarak aynı sonucu verecektir, ama bu deneyi yeterince tekrarlarsanız bazılarının aynı sonucu verdiğini görebilirsiniz; aygıttan geçen 159. foton ilk fotonla tam olarak aynı örüntüyü üretebilir, sonra 1022'inci, ondan sonra 5674'üncü ve böyle devam eder. Sadece bu fotonlara bakarsanız sanki hiç uyum bozulması yokmuş gibi bir girişim örüntüsü çıkardıklarını görebilirsiniz

"Yani, sen her gece yemliğin verini değiştirsen de benim tavşan-

nin dalga fonksiyonunu çıkarabilmem gibi, öyle mi?"

"Her seferinde yemliğin izini surebilirsen, evet."

"Çünkü tavşan hemen her zaman yemliğin altında oluyor da ondan değil mi?"

"Evet. Bütün bu konumları bir araya getirirsen, bir karmaşayla karşılaşırın; ama sadece yemliğin meşe ağacının altında bulunduğu durumları kullanırsan tavşanı çoğunlukla meşenin altında bulursun. Sadece, yemliğin iki akçaagacın altında bulunduğu durumları kullanırsan, tavşanı çoğunlukla orada bulursun bunun gibi."

"Anlaşıldı. Ama böyle yapmayacaksın, değil mi?"

"Seni böyle üzmem canım."

"İşte o yüzden de en sevdiğim insansın."

Bu durumda, çoğul dünyalar tablosunun Kopenhag yorumunun ortaya çıkardığı büyük problemlerin ikisini de ortadan kaldırdığını görüyoruz. Dalga fonksiyonunun gizemli "çöküşü"nü ortadan kaldırmakla kalmıyor, Kopenhag yorumunun mikroskobik ile makroskobik arasında yaptığı keyfi ayrımı da ortadan kaldırıyor. Çoğul dünyalar yorumuna göre, kutulardaki kediler gibi makroskobik nesneler de kuantum kurallarına uyar, süperpozisyon ve girişim etkileri gösterir. Biz bu etkileri, çevreyle, ortamla etkileşimin sebep olduğu uyum bozulması yüzünden görmeyiz. Ama kedi ile ortamı arasındaki bütün etkileşimlerin izini sürebilseydik dalga fonksiyonunu yeniden kurabilir, her ölçekte kuantum mekanığının işlediğini doğrulayabilirdik.

Elbette, bırakın bir parça bife ya da aç bir köpek gibi makroskobik nesneleri oluşturan parçacıkları, en basit bilimsel deneylerdeki bütün parçacıkların tam olarak durumlarının izini bile sürmek imkânsızdır. Sonuçta uyum bozulması süreci her zaman gerçekleşir ve son derece hızlı gerçekleşir. Bir nesnenin daha büyük bir ortamla etkileşim içinde olduğu her seferinde uyum

bozulmasını görürsünüz; bütün nesneler her zaman ortamlarıyla etkileşim içindedir. Elinizde ne kadar fazla atom olursa, sistemin ortamla etkileşim içinde olma olasılıkları da o kadar fazladır; uyum bozulması da o kadar hızlı gerçekleşir. Bir bilet parçasında yaklaşık  $10^{23}$  atom bulunur; dolayısıyla uyum bozulması son derece hızlı gerçekleşir; o kadar hızlı ki kuantum etkilerini görme şansımız hiç olmaz.<sup>6</sup>

Gerçek nesneleri, ortamlarından, kuantum girişimini görebilecek kadar yalıtmak son derece zordur, ama bu yapılabilir. Deneyciler son derece iyi vakumlanmış, genelde bileşenleri mutlak sıfıra yakın derecede soğutulmuş odalarda çok az sayıda parçacık kullanarak kuantum etkilerini göstermeyi başarmışlardır. Bu tür deneylerin en büyüğünde, mutlak sıfırdan birkaç derece daha sıcak bir süperiletken devresinin içindeki bir milyar elektron kullanılmıştı. Elektronlar, devrenin etrafında saat yönünde ve saat yönünün tersinde akışa denk gelen hallerin süperpozisyonunda bulunuyordu (bir köpeğin Central Park'ın etrafında aynı anda hem saat yönüne hem tersine yürümesi gibi). Bir milyar elektron kulağa çok gibi geliyor; ama gündelik nesnelerle karşılaştırıldığında hala çok küçüktür. Fakat bu elektronlar, ortam yeterince titiz kontrol edildiğinde, çok sayıda parçacıkla kuantum davranışlarını görebileceğimizi göstermeye yarar.

6- Bu durum, birinci bölümde gördüğümüz üzere 10 gramlık bir parça b.f. tegin dalga boyunun  $10^{-29}$  metre olmasının üzerine tuy dıker. Dalga boyunun bu uzunluğu eşevresizlik söz konusu olmasaydı da biletin girişim örüntüsünü ölçmemizi neredeyse imkânsız kılardı

## Gerçekliğe Çıkmak: Uyum Bozulması ve Yorumları

Uyum bozulması fikri hiçbir şekilde, kuantum mekânığının çoğul dünyalar yorumuna özgü değildir. Uyum bozulması bütün yorumlarda olan gerçek bir fiziksel süreçtir. Kopenhag yorumunda ölçüm sürecinin ilk adımı olarak ortaya çıkar. Sonunda varlabilecek halleri belirler. Uyum bozulması iki ya da daha fazla halin eşvreli superpozisyonunu (hem A hem B) belli durumun uyumu bozulmuş girişimine çevirir (ya A ya B). Sonra bilinmeyen başka bir mekanizma dalga fonksiyonunun bu hallerden birine çökmesine ve ölçüm sonucunu vermesine yol açar. Çoğul dünyalar yorumunda uyum bozulması dalga fonksiyonunun farklı kollarının etkileşim içine girmesini engelleyen şeydir her dalda sadece o dalı algılayan bir gözlemci vardır.

Her iki durumda da uyum bozulması kuantum superpozisyonlarından klasik gerçekliğe çıkma yolunda temel bir adımdır. Kuantum kuramının bütün somut öngöruları, yorum ne olursa olsun, mutlak bir benzerlik gösterir. Hangi yorumu beğenirseniz beğenin, dalga fonksiyonunu bulmak için aynı denklemleri kullanırsınız ve dalga fonksiyonu da size bir ölçümdeki farklı olası sonuçların olasılıklarını verir. Bilinen hiçbir deney Kopenhag yorumu ile çoğul dünyalar yorumu arasında ayırım yapmayacaktır. Bu yüzden hangisini kullandığınız aslında bir zevk meselesidir. Bu yorumlar sadece, dalga fonksiyonunun öngördüğü olasılıklardan fahi bir ölçüm sonucuna doğru ilerlediğimizde neler olduğunu düşünmenin farklı biçimleridir.

7. Başka yorumlar arasında da ayırım yapmayacaktır. Kuantum mekânığının yorumları bir deneyin sonuçlarıyla ilgili farklı bir sözünkçe veren bir "metakuram" gibidir. ama deney sonuçlarını değiştirmezler. Her an so ya da bu yorumu deneysel olarak kanıtlanabilir iddia eden biriyle karşılaştırabiliriz ama onların kalası kararmaz olarak karışık.



"E peki ben evrenimi nasıl seçeceğim?"

"Anlamadım "

"Ben bİftek yediğim evrende olmak istiyorum. Hangi evrende olacağımı belirleyen şey ne? İsteddiğimi elde etmek için bunu nasıl değiştirim?"

"Hım. Bir kuantum ölçümünün sonucunu etkilemek için yapabileceğin bir şey yok, bildiğimiz kadarıyla. Tümyle rastgele; bunu ister bir dalga fonksiyonunun çökmesi olarak düşün ister evrenin bütün dalga fonksiyonunun tek bir dalını algılamak olarak düşün. Hangisi olursa olsun rastgele sonuçlara bağlısın "

"Ama çok dünyalı yorumda dalga fonksiyonunun her zaman Schrodinger denkleminde uygun olduğunu söylemiştin? Hangi dalın gerçek olduğunu belirlemek için bunu kullanamaz mısın?"

"Farklı dallardaki olasılıkları öngörmek için bunu kullanabilirsin, ama her dalda senin, kendi ölçüm sonuçlarını algılayan bir versiyonun olacak. Bunların her biri de kendilerinin "gerçek" dalda olduğunu düşünecek ve neden farklı bir dalda olmadıklarını soracak. Kuram birinden birinin gerçek olmasıyla ilgili bir şey söylemiyor "

"Yani bu .. Bu aslında çelme."

"Uzgunum ama öyle. Matematiksel olarak daha zarif; ama di-bine baktığında Kopenhag yorumundan daha tatmin edici değil. Soruyu bir düzey daha geri itmek gibi bir şey "

"Yorumlar aptalca."

"Bu düşüncende yalnız değilsin, ama şimdilik bunlara bağlıyız "

"Ben sevmedim. Bİftek yemek istiyorum. Kuantum ölçümü bİftek yememi sağlamayacaksa daha fazla uğraşmak istemiyorum "

"Yorumlar hiçbir şekilde kuantum kuramının tamamı değil. Zamanlarını bu meselelere harcayan pek az insan var. Fizikçilerin çoğu yorumlar üzerinde durmaz. Kuantum mekanığını yarar-

lı işler için kullanmaya bakar.”

“Ölçüm rastgeleyse nasıl olur da onunla yararlı bir iş yaparım  
hırsın kı?”

“Gelecek bölümde görürsun.”

## Daha Gelmedik mi? Kuantum Zeno Etkisi



İş yerinde uzun, sınır bozucu bir gün geçirmiştım; günüm bir komisyon toplantısından öbürüne koşmakla geçmişti; eve geldiğimde başım zonkluyordu. Kate eve gelene kadar yaklaşık bir saatım vardı, tek istediğim biraz kestirmekti. Emmy beni görünce kendinden geçti, mutluluktan oturma odasının her tarafında dans etti.

"Yaşasın! Evdesin! Oleeey!" Kuvruğunu o kadar sert sallıyordu ki neredeyse dengesini kaybedecekti. Her öğleden sonra eve geldiğimde böyle oluyor

"Seni görmek de güzel "

"Hadı eğlenceli bir şeyler yapalım! Hadi atmaca-kapmaca oynayalım! Hadi yuruyüşe çıkalım! Hadi yuruyüşe çıkıp atmaca kapmaca oynayalım!"

"Hadı ben biraz kestireyim " Zıplamayı hemen kesiyor, başı öne eğiliyor Kulaklarını, kuvruğunu sarkıtıyor "

"Yuruyüşe çıkmak yok mu?"

"Hayır, şimdi değil," diyorum. kanepeye uzanarak "Ben yarın saat kestireyim, sonra eğlenceli bir şeyler yaparız "

"Söz mü?"

"Söz. Şimdi sessiz ol. Ne kadar çabuk uyursam, o kadar çabuk eğlenceli bir şeyler yaparız."

"Ha, peki."

Uzaniyorum, kanepeye rahatça yerleşiyorum. Tam içim geçip uykuya dalacakken, soğuk, ıslak bir burnun yüzümü duruttuğunu hissediyorum.

"Uyuyor musun?"

"Hayır. Uyumuyorum."

"Haa." Bir dakika geçiyor.

Durtuyor. "Uyuyor musun?"

"Hayır." Bir dakika daha geçiyor.

Durtuyor. "Uyuyor musun?"

"Hayır!" Kalkıp oturuyorum. "Bak burnunla durtukleyip şu soruyu sormayı bırakmazsan hiç uyuyamayacağım."

"Neden?"

"Beni her durttuğunda, uyandırırıyorsun ve yeniden başlamam gerekiyor. Uyandırıp durursan tam olarak uyuyamam ve sen de eğlenceli bir şeyler göremezsin."

"Haa." Yuzu parlıyor. "Hey bu tıpkı Zero Effect (Sıfır Etkisi) gibi!"

"Ne etkisi?"

"Bilirsin canım. Hani kaplumbağayı yakalayamayan adam var ya, onun gibi, hani yolun yansını görmesi gerekiyor, sonra diğer yarısını, hiç ulaşamıyor ya?"

"Zeno paradoksu demek istiyorsun. Zeno, "n"yle. Senin dediğin Zero Effect Bill Pullman ve Ben Stiller'in oynadığı bir film."

"Neyse ne, telaffuzum o kadar iyi değil."

"Neyse düşündüğün şey kuantum Zeno etkisi. Evet, bu biraz onun gibi. Bir durumdan diğerine geçen bir sistem varsa, ikinci durumda olma olasılığı zamanla artıyorsa tekrarlanan ölçümlerle hal değişikliğini önleyebilirsin. Birinci durumda olup olmadığını ölçtüğün her seferinde süreci yeniden başlatmış olursun."



"Dogru O zaman, sana uyanık olup olmadığını sordugumda dalga fonksiyonunu 'uyanık haline çokertmiş oluyorum ve senin de yeniden uyumaya başlaman gerekiyor "

"Ya da çoğul dünyalar tablosuna göre, kendini benim uyanık olduğum dalga fonksiyonunu algılarken buluyorsun Ama evet, ana fikir bu, iyi benzetme "

Ben filozof bir kopeğim "

"Evet, çok akıllısın Şimdi sus da biraz uyuyayım "

"Peki Uyuyor musun diye bir daha sormayacağım "

"Teşekkür ederim "

Yeniden kanepeye yerleşiyorum, içim ısınıyor, tam dalacak ken

Dartıyor "Uyanık mısın?"

İster Kopenhag yorumunu ister çoğul dunvalar yorumunu tercih edin, bir ölçüm yaptığınızda *bir şey* olur. İster bir dalga fonksiyonunu fiziksel olarak çokerttiğini düşünün, ister algınızı genişleyen ve gelişen bir dalga fonksiyonunun tek bir dalıyla sınırladığını düşünün, ölçüm etkin bir sureçtir. Siz bir nesnenin durumunu ölçmeden önce, nesne olası bütün durumların kuantum superpozisyonundadır; ölçümden hemen sonraysa sadece ve sadece bir durum gözlersiniz

Bu bölümde etkin ölçümün en önemli sonucuna, "kuantum Zeno etkisi"ne bakacağız. Bir kuantum parçacığını tekrar tekrar ölçmenin, onun halini değiştirmesini engellediğini göreceğiz Kuantum Zeno etkisini, nesnelerin varlığını onlara tek bir ışık fotonuyla bile vurmadan tespit etmek için de kullanabiliriz

## Buradan Hiçbir Yere Gidemezsin: Zeno Paradoksu

Bu etkinin isminde, MÖ beşinci yüzyılda yaşamış Yunan filozofu Zeno'nun meşhur paradokslarına bir gönderme vardır. Bu paradoksların birkaç farklı versiyonu vardır, ama hepsinin de amacı hareketin imkânsız olduğunu göstermektir.

İşte size bu argümanın modern köpekli bir versiyonu. Odanın diğer ucunda duran bir odule ulaşabilmek için bir köpeğin önce odanın yarısını aşması gerekir, bu sonlu bir zaman alır. Sonra geri kalan mesafenin yarısını aşması gerekir, bu da sonlu bir zaman alır, sonra geri kalan kısmın yarısını vs. Odanın bir ucundan diğerine olan mesafe sonsuz sayıda yarıya bölünmüştür, bunların hepsini de aşmak sonlu bir zaman alır. Her biri sonlu bir zaman süren sonsuz sayıda yarıyı birbirine eklerseniz odanın bir ucundan diğerine gitmek sonsuz zaman alacaktır. Dolayısıyla zavallı köpeğin lezzetli odulüne ulaşması imkânsızdır.

Her yerdeki aç köpekleri mutlu edecek bir habertim var. Bu açık paradoksun bir çözümü vardır. Mesafe küçülürken, onu aşmak için gereken zaman da azalır. Odanın yarısı bir saniyede aşılsa sonraki yarı çeyrek yarım saniyede, ondan sonraki sekizde bir çeyrek saniyede aşılabilecektir ve bu şekilde devam edecektir. Butun bu süreleri birbirine eklersek şunu buluruz:

$$1s + 1/2s + 1/4s + 1/8s + \dots = 2s$$

Toplam süre, sonsuz sayıda terimin toplamıdır, ama siz ilerledikçe terimler küçülür. On yedinci ve on sekizinci yüzyılda integral ve diferansiyel hesabının icat edilmesiyle matematikçiler bu tür dizileri nasıl toplayacaklarını öğrendiler. Sonsuz toplam sonlu bir sonuç verir. Köpek odanın bir ucundan diğerine iki saniyede gider. Nihayetinde hareket mümkündür ve iyi bir köpek odullerine her zaman ulaşabilir!

1. Sonsuz dizilerin toplanması fizikçiler, mühendisler ve çoğu

Seyredin

...m Zeno etkisi  
...bir durumdan  
...vapur olçüm  
...den vararlanı  
...bir süre sonra  
...bulunacaktır  
...uzere on  
...başlar

Atomun halini  
...dondurmeyi si  
...de hava girer: Ay  
...alaşamamak  
...kazan kaynamaz; e

Bu durum klasi  
...nsenin halini öl  
...apıldığında yarı  
...ıktan sonra da ya  
...Zeno etkisi, sadece  
...bir kuantum  
...durdur Kaynamac  
...den başlamanız ge

...in Zeno paradoksu  
...mo paradoksunun  
...dia of Philosophy) Bu  
...bir olgı olduğunu

...yunan edebiyatın  
...sı ebediyen  
...tazinde

## Seyredilen Kazanlar ve Ölçülen Atomlar: Kuantum Zeno Etkisi

Kuantum Zeno etkisi, bir kuantum nesnesinin, örneğin bir atomun bir durumdan diğerine geçmesini engellemek için tekrar tekrar yapılan ölçümler yoluyla, kuantum ölçümünün etkin niteliğinden yararlanır. Atomu, geçiş sürecinin başlamasından çok kısa bir süre sonra ölçecek olursak çok büyük olasılıkla ilk durumda bulunacaktır. Atomu ölçme eylemi, üçüncü bölümde gördüğümüz üzere onu ilk hale geri gönderir ve geçiş süreci yeniden başlar.

Atomun halini ölçmeyi sürdürürsek onu başladığımız yere geri dondurmeyi sürdürürüz. Atom Zeno paradoksunu andıran bir belaya girer: Aynı hedefe doğru sonsuz sayıda adım atıp asla oraya ulaşamamak.<sup>2</sup> Eski bir atasözünde dendiği gibi seyredilen kazan kaynamaz; en azından bir kuantum kazanıysa.

Bu durum klasik fizikle ciddi bir farklılık gösterir. Klasik bir nesnenin halini ölçmek halini değiştirmez; bir kazan su, ölçüm yapıldığında yarı yarıya kaynama noktasındaysa, ölçüm yapıldıktan sonra da yarı yarıya kaynama noktasında olur. Kuantum Zeno etkisi, sadece kuantum ölçümünün etkin niteliği yuzunden işler, bir kuantum kazanındaki su ya kavniyordur ya kaynamıyordur. Kaynamadığını görürseniz, hiç ısıtmamışsınız gibi yeniden başlamanız gerekir.

---

icin Zeno paradoksunun çözümü olarak kabul edilse de bazı filozoflar bunu Zeno paradoksunun yeterli bir çözümü olarak görmez. (Stanford Encyclopedia of Philosophy) Bu sadece filozofların matematikçilerden, hatta kedilerden bile çılgın olduğunu gösterir

2- Yunan edebiyatından daha iyi bir benzetme Sisyfos efsanesi olabilir. Sisyfos, ebediyen bir kayayı bir tepeye çıkarma, kayanın aşağıya düşmesi sonrasında tekrar yukarıya çıkarma cezasına çarptırılmıştır. Ama "Sisyfos etkisi" başka bir şey için kullanıldığından buna kuantum Zeno etkisi denmiştir

Belirleyici bir nitelik taşıyan kuantum Zeno etkisi dene-  
1990'da Colorado NIST'te Dave Wineland'in grubunda yer alan  
Wayne Itano tarafından berilyum iyonları kullanılarak gerçek-  
leştirildi. İyonlar bir tek elektronu alınmış atomlardır ve ha-  
rın atomlar gibi onlar için de bir izimli durumlar dizisi vardır  
ışık soğurarak ya da salarak bu durumlar arasında gidip gelir-  
ler. Itano'nun deneyinde birkaç bin berilyum atomu toplanmış ve  
mikrodalgaya tabi tutularak bir durumdan diğerine yavaşça geç-  
meleri sağlanmıştı.

Ölçülmediklerinde, iyonların birinci durumdan ikinci dura-  
ma geçmeleri 256 milisaniye sürmüştü.<sup>3</sup> Bu süreçteyken durum-  
ları atomu birinci halde ve ikinci durumda bulmaya denk ge-  
len iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonuyla betimleniyordu.  
Deneyin başında atomlar yüzde 100 birinci, sonundaysa yüzde  
100 ikinci durumdaydılar. Arada, ikinci durumun olasılığı süre-  
kli artmış, birinci durumun olasılığı sürekli azalmıştı.

Deneyi yapanlar iyonların durumunu, frekansı birinci du-  
rumdaki iyonların ışık soğuracağı, ikinci durumdaki iyonların  
hiç ışık soğurmayacağı şekilde ayarlanmış bir ultraviyole lazerle  
ölçmüşlerdi. Birinci durumdaki iyonlar lazerden gelen fotonla-  
rı soğuruyor ve birkaç nanosaniye sonra bunları salıyor, iyonlara  
doğrultulmuş bir kameranın üstünde parlak bir nokta oluşması-  
na neden oluyordular. İkinci durumdaki iyonlarsa lazerle aydınla-  
nıldıklarında hiç ışık üretmiyorlardı. Bu durumda kameraya ula-  
san ışığın toplam miktarı, birinci durumdaki atomların sayısının  
doğrudan ölçümü oluyordu.

NIST grubu, kuantum Zeno etkisini göstermek için hepsi de  
birinci durumda bulunan çok sayıda iyonu kısırdı. Deneyciler  
sonra mikrodalgaları açtılar; 256 milisaniye beklediler ve lazeri

<sup>3</sup> Bir saniyenin çeyreği insanlar ya da kopeklere çok hızlı gelir, ama asıl-  
da bir atom için yavaştır. Atomlar genellikle saniyenin birkaç milyarda bir  
inde durum değiştirir.



açılar iyonların hiçbirini ışık üretmedi, bu, örneklem grubunun yüzde 100'ünün beklendiği üzere ikinci duruma geçtiğini gösteriyordu. Sonra deneyi iki lazer vuruşuyla tekrarladılar. Lazer vuruşlarından biri 128 milisaniye sonra (ikinci hale geçişin ortasında), diğeri de 256 milisaniye sonra gerçekleştirildi. Bu durumda, 256 milisaniye sonra, ışığın ancak yarısını görebildiler, bu da iyon grubunun ancak yarısının ikinci duruma geçebildiğini gösteriyordu.

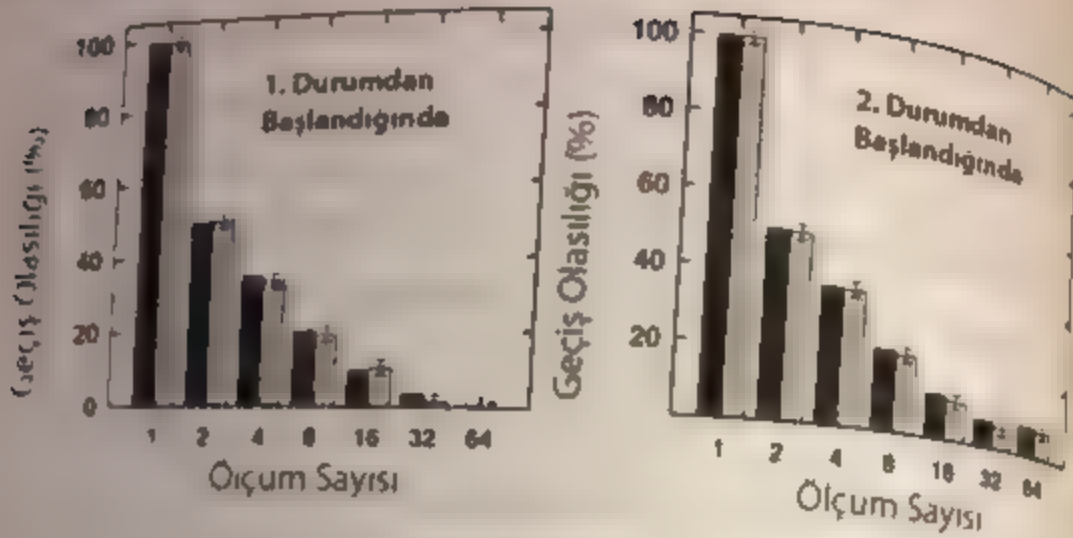
Olasılığın azalması kuantum Zeno etkisiyle açıklanır. Deneyin ortasında yapılan lazer vuruşu, iyonların durumunu ölçmüştür. Birçoğu o sırada birinci durumda bulunduğundan, ölçüm dalga fonksiyonunun ikinci duruma denk düşen kısmını ortadan kaldırmıştır. Bu atomlar artık yüzde 100 birinci durumdadırlar, ikinci durum olasılığının yavaş yavaş artmasıyla geçiş sürecinin yeniden başlaması gerekmiştir. Yine bir 128 milisaniye sonra bu iyonları ikinci halde bulma olasılığı ancak yüzde 50'dir.

Birinci durumdan ikinci duruma geçiş olasılığı başka ölçümlerle daha da azaltılmıştır. Dört lazer vuruşu yapıldığında (64, 128, 192 ve 256 milisaniyelerde) atomların ancak yüzde 35'i geçişi tamamlamıştır. Sekiz vuruş yapıldığında, geçişi ancak yüzde 19'u tamamlamıştır. Deney süresi boyunca toplam 64 (her dört milisaniyede bir) lazer vuruşu yapıldığında atomların yüzde 1'inden daha azı geçişi tamamlayabilmıştır. Aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere, bu olasılıkların hepsi de kuantum Zeno etkisinin kuramsal öngörleriyle mukemmel bir uyum gösterir.

"Yani bir ölçüm yaptığında, iyonlar bir foton soğuruyor ve bu da dalga fonksiyonunu mu çokertiyor?"

"Aslında iyonun foton soğurmasına gerek yok. Wineland grubu bu deneyi ikinci durumdaki iyonlarla başlayarak tekrarladı. Bu durumda, iyon 'karanlık' durumda başlar; ölçümler sırasında hiç foton soğurmaz. Yine aynı sonuca varıldı; ikinci durumdan birinci duruma geçiş olasılığı tam tahmin edildiği gibi ölçüm

azalışı azalır”



Wineland grubunun (W.M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger ve D. J. Wineland Phys. Rev. A 41, 2295-2300 (1990), çizile değiştirilip yeniden basılmıştır) yaptığı deneyde bir durumdan diğerine geçme olasılığı. Siyah çubuklar kuramsal tahminleri, gri çubuklar deneysel sonuçları gösterir, hata çubuklarıysa deneysel belirsizliği. Deneye iyonların birinci durumda olduğu halden başlansa da ikinci durumda olduğu halden başlansa da ölçüm sayısı arttıkça durum değiştirme olasılığı azalır.

“Bir dakika, dur bakalım. Foton soğurmamak foton soğurmamakla aynı şey mi?”

“Fotonları ölçüm aygıtları olarak düşünürsen, evet. İki kutudan birinde bulunan ödül gibi; kutulardan birini açıp boş olduğunu görürsen ödülün diğer kutuda olması gerektiğini anlarsın. Bu da sanki kutuyu açıp ödülü orada görmüşsun gibi ödülün durumuna belirler.”

“Ama pek de eğlenceli değil, ödülü alamıyorum.”

“Ya evet çok zor bir hayatın var.”

Kuantum Zeno etkisi, kuantum mekaniğinin belli bir yorumuna dayanmaz. Kopenhag yorumunun dilini kullanıp dalga fonksiyonunun çöküşünden bahsederek neler olup bittiğini

Bakmadan

Kuantum Zeno etkisi

Vienna'da yapılan

tartışmak kolaydır, ama olup bitenler çoğul dünyalar yorumuna başvurarak da o kadar iyi betimlenebilir. Çoğul dünyalar yorumunda, her ölçümde, dalga fonksiyonunda yeni dallar belirir; ama bizim daha yüksek olasılık dalını algılamamız daha olasıdır. Bir durum değişimini görme olasılığı her iki yorumda da aynıdır.

Kuantum Zeno etkisini, bir sistemin durum değiştirme olasılığını azaltmak için, sistemi birçok kez ölçerek kullanabiliriz. Değişim olasılığını hiçbir zamana tam olarak sıfıra indiremeyiz; ölçümlere rağmen sistemin değişmesi olasılığı her zaman vardır; ama bu olasılığı çok küçültebiliriz, bu da kuantum ölçümünün gücünü gösterir.

"İnsanlar çok aptal. Geçiş sürecini durdurmak istiyorsan, mikrodalgayı kapatmak daha kolay olmaz mı?"

"Evet, kesinlikle, ama burada asıl mesele kuantum Zeno etkisinin gerçek olduğunu göstermek. Iyonların durum değişimini durdurabildiği için değil, kuantum fizik hakkında söylediği şeyler yüzünden ilginç."

"Evet, ama ne yararı var? Yararlı bir şey yapıyor mu?"

"Evet, kuantum Zeno etkisini, nesneleri, ışık soğurmalarına gerek bırakmadan tespit etmekte kullanabilirsin."

"Nesneleri... Tavşanları mesela?"





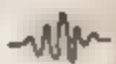

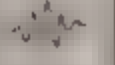



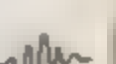

"Kesinlikle, varsayımsal olarak."

"Ooo! Bak bu kulaga harika geliyor!"

## Bakmadan Ölçmek: Kuantum Sorgulama

Kuantum Zeno etkisi muhteşem şeyler yapmak için kullanılabilir. Innsbruck Üniversitesi ile Los Alamos Ulusal Laboratuvarı arasında yapılan bir işbirliği, ışık soğuran bir nesnenin varlığını, ışık kullanarak, ama kuantum Zeno etkisiyle fotonun bir yerden diğerine hareket etmesi durdurulup nesnenin foton soğur-

maması sağlanarak tespit etmenin mümkün olduğunu göstermiştir. İlerde bu teknik bir tek fotonu bile söğürmeye dayanamaya cak kadar hassas kuantum sistemlerinin özelliklerini incelemek te kullanılabilir.

	Tavşan yok			Tavşan	
Başlangıç		%100	%0		
25 vuruş		%85	%15		
50 vuruş		%50	%50		
100 vuruş		%0	%100		

Aygıtın sol tarafında iki ayna arasında gidip gelen bir fotonla başlarız. Fotonun ortadaki aynadan sızması gibi küçük bir olasılık vardır, böylece zamanla foton aygıtın sağ tarafına geçer. Sağ tarafta söğüran bir nesne, örneğin bir tavşan varsa, nesne kuantum Zeno etkisi yüzünden fotonun hareket etmesini engellevecektir.

İşte bu kuantum sorgulama deneyinin sadeleştirilmiş bir versiyonu. Mukemmel sırlanmış iki ayna arasında gidip gelen tek bir fotonumuz olduğunu düşünelim. Bu iki aynanın arasına o kadar da mukemmel olmayan üçüncü bir ayna yerleştirelim.

Bu sistemin dalga fonksiyonu iki kısımdan oluşur. Bir kısım fotonun aygıtın sol tarafında bulunmasına, diğer kısım fotonun



sağ tarafa bulunmasına karşılık gelir. Deneye, sol varıda bir fotonla başlarsak zaman içinde fotonun yavaşça sağ yarıya geçtiğini fark ederiz. Foton ortada bulunan kusurlu aynaya her çarpıştığında, obur tarafa geçmesi gibi küçük bir olasılık vardır, bu yüzden de dalga fonksiyonunun sol kısmı biraz küçülürken, sağ tarafı biraz büyür. Nihayetinde dalga fonksiyonunun sol kısmı sifıra inecek ve fotonu sağ tarafa bulma olasılığı yüzde 100 olacaktır. Sonra süreç tekrarlanır. Foton "yavaşça" aygıtın iki tarafı arasında gidip gelir, çalkalanır, tıpkı NIST deneyindeki iyonların birinci durum ile ikinci durum arasında hareket etmesi gibi.

Fotonun konumunu ölçmek için bir aygıt ekleyerek, örneğin aygıtın sağ tarafına bir tavşan koyarak kuantum Zeno etkisini te-  
tikleyebiliriz. Foton ortadaki aynaya her çarpıştığında tavşan, fotonun aynadan geçip geçmediğini ölçer, çok ürkek olduğundan sağ tarafa tek bir foton bile tespit etse kaçıp gidecektir.

Tavşanın olmaması durumunda gerçekleşen "çalkalanma" etkisi tavşanın var olması durumunda kuantum Zeno etkisi yüzünden engellenecektir. Foton aynadan geçerse tavşan onu söğür ve kaçar. Foton artık yoktur, bu yüzden de dalga fonksiyonu sıfırdır, bundan sonra hiçbir şey değişmez. Geçemezse, foton kesinlikle sol taraftadır ve dalga fonksiyonu, fotonun sol tarafta olduğu hali alır ve her şey yeniden başlar.

Kuantum Zeno etkisi, her kopeğin yapmak istediği şeyi yapmamızı mümkün kılar. Aygıtın içinde tavşan olup olmadığını onu kaçırmadan belirlememizi sağlar. Aygıtın sol tarafında bir fotonla başlarız, onun sağ tarafa geçmesine vetecek kadar bir süre bekleriz, sonra aygıtın sol tarafına bakarız. Orada foton yoksa sağ tarafa tavşan yoktur; ya fotonu söğürüp kaçmıştır ya da orada hiç tavşan olmamıştır ve foton da sağ tarafa çalkalanmaktadır. Foton hâlâ aygıtın sol tarafındaysa sadece bir tavşan olduğunu değil, tavşanın hâlâ orada olduğunu tek bir ışık fotonu bile söğürmediğini biliriz.

Fotonun sağ tarafa geçip tavşanı korkutması ihtimali hep vardır, ama fotonun avnadan geçmesi olasılığını azaltarak bu olasılığı istediğimiz kadar düşürebiliriz. Fotonun sağ tarafa "geçmesi" için gereken süre artacağından ölçümü tamamlamak için daha uzun süre beklememiz gerekir, ama tavşanı tespit etme olasılığımız ciddi bir artış gösterecektir. Fotonun, sağ tarafa geçmeden önce sol tarafta iki ayna arasında 100 kere gidip gelmesi gerekir, yorsa korkutup kaçırmadan bir tavşanı tespit etme olasılığı yüzde 98.8'dir. Deneyi 1000 kere tekrarlıyorsanız sadece 12 tavşanı korkup kaçacaktır.

"Ooo! Yani benim sadece büyük aynalara ihtiyacım var!"

"Hayır. Bu deneyi arka bahçeye kuramazsın."

"Ama tavşanları yakalamak için kuantum Zeno etkisini kullanabilirim."

"Hayır.. Hayır. Arka bahçeye büyük aynalar koymuyorsun. Bu son sözüm."

"Aman, pof!"

Kuantum sorgulaması, tavşanı yakalamakta kullanılmamıştır. Innsbruck, Los Alamos ve Illinois'deki fizikçiler tarafından polarize foton kullanılarak deneysel olarak gösterilmiştir. Kuantum sorgulaması bazı inanılmaz işler yapmanızı mümkün kılar, örneğin nesnelerin fotoğrafını, onlara hiç ışık çarptırmadan çekmenizi sağlar. Bu casusluk amacıyla işe yarar bir şey değildir (düşmanlarınızı, sırlarını iki ayna arasına saklamak zorunda bırakmazsanız), ama bir fotonun söğürülmesine dayanamayacak süperpozisyon durumlarındaki büyük atom toplulukları gibi hassas kuantum sistemlerinin incelenmesi için temel önemde olabilir.

İster dalga fonksiyonunun çökmesiyle, ister genişleyen tek bir dalga fonksiyonunun uyum bozulması surecinden geçmesiyle düşünün, kuantum Zeno etkisi kuantum ölçümünün tuhaf niteliğini gösteren önemli bir etkidir. Klasik ölçümün tersine bir

kuantum sisteminin ölçümü o sistemin durumunu değiştirir; bu klasik olarak beklediğimizden çok farklı bir şeydir. Deneysel ortamın akılcıca düzenlenmesiyle, bu, bir sistemin durum değiştirmesini engellemek ya da bir sistemden onunla doğrudan etkileşime girmeden bilgi almak için kullanılabilir.

"Bu gerçekten ilginç. Tuhaf ama ilginç."

"Teşekkürler."

"Şimdi, izin verirsen, kaseme bakmam lazım."

"Nedenmiş o?"

"Daha fazla yiyecek almak için Zeno etkisini kullanacağım. Düşündüm de kasemi hep ağzına kadar doluyken ölçersen ne kadar yersem yiyeyim hep mamam olur. Bu da gayet hoş olurdu hanı."

"Tabii, kasemi boşken ölçersen hep boş kalır ve hiç mamam olmaz."

"Ay, bu berbat olurdu. Bak bunu hiç düşünmemiştim."

"Her neyse. Bunun işlemesi için mamanın kasede belirmesine yarayacak doğal kuantum süreçlerini kullanman lazım. Şeyler, sırf sen onları ölçmek istedin diye ortada hiç sebep yokken belirmez."

"Eh, sen bazen kaseme mama koyuyorsun, değil mi? Doğal bir süreçsin."

"Bır bakıma."

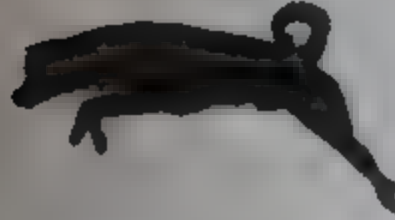
"Öyleyse kaseme mama koymaya ne dersin?"

"Peki, peki. Neredeyse yemek vakti. Hadi gel."

"Ooo! Mama!"

## VI

### Kazmaya Gerek Yok: Kuantum Tünelleme



Arka bahçede, güneşli güzel bir öğleden sonranın tadını çıkarıyoruz. Şezlonga oturmuş, kitap okuyorum. Emmy de çimlerin üzerine serilmiş, güneşleniyor, bir gozuyla de sincapları kolluyor.

"Bir şey sorabilir miyim?" diyor.

"Hmm? Elbette, sor bakalım."

"Tünelleme hakkında ne biliyorsun?"

"Tünelleme, ha?" Kitabımı bırakıyorum. Bir parçacığın, bir engelin öbür tarafına, o engeli aşacak enerjisi olmamasına rağmen geçebildiği bir süreçtir."

"Engel ha? Çit gibi mi yani?"

"Metaforik olarak evet diyebilirsiniz."

"Bu bahçeyle diğeri arasındaki çit gibi mi?" Gerçekten de umutlu görünuyor.

"Aha! Bununla mı ilgiliydi?"

"Tavşanlar var orada!" Kuyruğunu bir dakika kadar sallıyor, sonra yılmış görünuyor. "Ama onlara ulaşamıyorum."

"Doğru, ama sanma ki bunun çözümü tünelleme olur. Küçük parçacıklarda işe yarar o, kopeklerde işlemez."

"Neden ama?"



"Bak, bir engeli potansiyel ve kinetik enerji açısından düşün-  
nebilirsin. Örneğin şimdi senin bütün enerjin potansiyel enerji,  
çünkü hareket etmiyorsun. Ama diyelim, bir sincabın peşine ta-  
kılırsan hareket etmeye başlayabilirsin ve bu potansiyel enerji-  
kinetik enerjiye çevirirsin."

"Çok hızlıyım! Çok enerjim var."

"Evet biliyorum. Bizim için büyük sınavsın. İster hareket ed-  
yor ol ister oturuyor, aynı miktarda enerjiye sahipsin. Mesele  
enerjinin hangi biçimde olduğu."

"İyi de bunun çitle ne ilgisi var?"

"Bak şimdi, çiti ancak yeterince enerjin olduğunda gidebi-  
ceğin bir yer olarak düşün. Çitin olduğu yerde olabilmek için ya  
çok yukseğe sıçraman ya da başka bir biçimde çitle aynı uzamı iş-  
gal etmen gerek. İkisi de acayip fazla enerji ister."

"O kadar yukseğe sıçrayamam, o yüzden de tavşanlara ulaş-  
mıyorum."

"Evet. Çiti aşacak enerjin yok. Yeterince enerjin olmadığı için  
de komşunun bahçesine geçemiyorsun. Herkes böyle daha mut-  
lu, inan bana."

"Ben hariç." Somurtuyor

"Evet, sen hariç." Özur diler gibi kulaklarının arkasını kaşıyo-  
rum. "Yine de kuantum mekanığı çitin üzerinden aşacak enerjin  
olmasa bile obur tarafa geçebilmenin hâlâ bir yolu olduğunu so-  
ver. Sanki orada yokmuş gibi çitin içinden geçebilirsin."

"Tavşanların yaptığı gibi mi yani?"

"Nasıl, anlamadım?"

"Tavşanlar canım. Sürekli çitin bir o yanına bir bu yanına ge-  
cip duruyorlar."

"Evet, ama çitin parmaklıklarının arasına sığabildikleri için  
geçiyorlar. Bunun kuantum tunellemeye bir ilgisi yok." Bir an  
duruyorum. "Ama tabii, kötü bir benzetme değil. Tavşanların  
da çitin üzerinden aşacak enerjileri yok, ama içinden geçebili-

vor ve obur tarafa ulaşabiliyorlar. Bu da bir şekilde tunelden geçme gibi "

"Peki, ben nasıl çitte tunel açacağım?"

"Biraz daha az yiyip tavşanlar gibi parmaklıklar arasına sığabilecek kadar zayıflayabilirsin."

"Bu planı sevmedim. İyi bir köpeğim. Aldığım ödülleri hak ediyorum "

"Evet, hak ettiğin ödülleri de alıyorsun. Diğer seçenek çitte kuantum tuneli açmak olurdu, ama kuantum tüneli senin yaptığın bir şey değildir, oluveren bir şeydir. Engelin üzerine koca bir parçacık grubu gönderirsen bunların pek azı obür tarafa geçecektir Ama hangilerinin geçeceği tümüyle rastgeledir. Olasılıkla ilgilidir."

"Yani çite doğru yeterince fazla sayıda koşarsam, obür tarafa geçer miyim?"

"Ben olsam denemezdım. Bir parçacığın bir engelden tünelleme yoluyla geçmesi, engelin kalınlığına ve parçacığın kuantum dalga boyuna bağlıdır. 22,5 kıloluk bir köpeğin yaklaşık bir santim kalınlığındaki alüminyum engelin içinden geçebilmesi olasılığı  $1/e 10^{36}$ 'dır Bunun ne olduğunu biliyor musun?"

"Neymiş?"

"Sıfır. Ya da hiç fark etmeyecek kadar sıfıra yakın 0 yuzden de kalkıp kendini çitin üzerine atma."

Bir an susuyor.

"Eh, sanırım bu sorunu yaşıyor." Kitabımı alıyorum.

"Sayılır."

"Sayılır mı?"

"Bu kuantum mevzuu ilginç, ama ben klasik tünel açmayı düşünüyorum."

"Klasik tünel açmayı mı?"

"Çitin altına bir çukur açacağım "

"Haa!"

"İyi plan!" Kuyrugunu şevkle sallıyor, görünüşe bakınca kendinden memnun.

"Havır değil Yalnız kötü köpekler çukur açar."

"Haa" kuyruğu düşüyor, başı eğiliyor. "Ama ben iyi bir köpekim, değil mi?"

"Evet, sen çok iyi bir köpeksin. En iyisisin."

"Gobegimi kaşır mısın?" Sırt üstü yatıyor ve umutlu görünüyor.

"Ah peki." Kitabımı yine bırakıp gobegimi kaşımak için eğiliyorum.

"Tunelleme" en beklenmedik kuantum fenomenlerinden biridir, bir tür engelle karşı karşıya gelen bir parçacık, divelim ki bir çite doğru koşan bir köpek, sanki orada değilmiş gibi engeli aşacaktır. Bu tuhaf davranış, kuantum parçacıklarının ikinci bölümde gördüğümüz dalga niteliklerinin doğrudan bir sonucudur.

Bu bölümde temel fizikğin enerji kavrayışından ve enerjinin parçacıkların bulunma biçimini nasıl belirleyeceğinden bahsedeceğiz. Maddenin dalga niteliğinin, kuantum parçacıklarının klasik fizikğin ulaşamayacaklarını söylediği yerlere ulaşmalarını, katı nesnelerin içine girmelerini, hatta içinden geçmelerini mümkün kıldığını göreceğiz. Tunellemenin, bilim insanlarının maddenin yapısını inceleyen mikroskoplar yapmasını, biyokimya ve nanoteknolojide devrimci gelişmeler yaşanmasını mümkün kıldığını da göreceğiz.

um tunellemeyi aç  
... izikten bahsetm  
... seçiyse de fi  
... ndan biraz fark  
... "enerji"nin  
... maddenin enerji içe  
... ketini değiştirm  
... eği için ya da  
... durdurula  
... uzandan (f  
... lduğu için' bi  
... bir nesneyi ha  
... durdurmak ya  
... en belirg  
... lıskılı enerji  
... eden bir ne  
... n karesinin y  
... nek enerji her  
... gınızda artar  
... an küçük bir  
... hipraktif h  
... aynı olan,  
... araktır Kinet

## İşleri Halletme Becerisi: Enerji

Kuantum tunellemeyi açıklayabilmek için önce enerjiyle ilgili klasik fizikten bahsetmemiz gerekiyor "Enerji" fizikten genel kullanıma geçtiyse de fizikteki anlamı gündelik sohbetlerdeki kullanımından biraz farklıdır

Fizikteki "enerji"nin bir cümlelik bir tanımı şöyle olabilir "Bir maddenin enerji içeriği, kendi hareketini ya da başka bir cismin hareketini değiştirme becerisinin ölçüsüdür" Bir nesnenin hareket ettiği için ya da hareket etmeye başlayabileceği bir yer de hareketsiz durdurulduğu için enerjisi olabilir Her nesnenin sıfır kütlesi yüzünden (Einstein'ın  $E=mc^2$ 'si) ve ısı mutlak sıfırın üstünde olduğu için bir enerjisi vardır Butun bu enerji biçimleri duran bir nesneyi hareket ettirmek için ya da hareket eden bir nesneyi durdurmak ya da nesnenin yönünü saptırmak için kullanılabilir

Enerjinin en belirgin biçimi kinetik enerji, hareket eden bir nesneyle ilişkili enerjidir. Her gün karşılaşılabileceğimiz bir hızda hareket eden bir nesnenin kinetik enerjisi, kütlesiyle hızının çarpımının karesinin yarısına eşittir; genellikle şöyle ifade edilir

$$KE = 1/2 mv^2$$

Kinetik enerji her zaman artı bir rakamdır, kutleyi ya da hızı değiştirdiğinizde artar. Bir Danua'nın kinetik enerjisi onunla aynı hızda olan küçük bir Chihuahua'nın kinetik enerjisinden fazla olacaktır, hiperaktif bir Sibirya kurdunun kinetik enerjisi, onunla kütlesi aynı olan, yaşlı ve uykucu bir Bloodhound'dan daha fazla olacaktır. Kinetik enerji momentuma benzer, ama hızı artır-

1- Isı, bir nesneyi oluşturan tek tek atomların hareketinden kaynaklanan enerjiyi ölçer. "Mutlak sıfır" hareketin durduğu hayali ısıdır. Hiçbir gerçek nesne, mutlak sıfıra varıncaya dek soğutulamaz; soğutulsaydı bile o nesnenin, ikinci bölümde tartıştığımız üzere sıfır noktası enerjisi olurdu



diğinizda momentumdan daha hızlı artar ve momentumun tersine hareket yönüne bağlı değildir

Hareket halinde olmayan nesneler, başka nesnelerle etkileşimleri yüzünden hareket etmeye başlama potansiyeline sahiptir. Buna potansiyel enerji deriz. Bir masanın üstündeki ağır bir nesnenin potansiyel enerjisi vardır. Hareket etmiyordur, ama hıptır. Bir kopek masaya çarpar da nesne, kopeğin üzerine düşerse kinetik enerji kazanır. Yan yana tutulan iki mıknatısın her birinin potansiyel enerjisi vardır. Birakıldıklarında mıknatıslar ya birbirlerine yapışacak ya da birbirlerinden uzaklaşacaklardır. Bir kopeğin her zaman, uyurken bile potansiyel enerjisi vardır. En hafif bir gürültüde fırlayıp ortada hiçbir şey yokken havlamaya başlayabilir.

Enerji fizik açısından temel önemlidir, çünkü "korunan bir nicelik" enerjinin korunumu yasası enerji bir biçimden diğene değişebilir de bir sistemdeki toplam enerji miktarının değişmeden kalacağını söyler. Bu durum bazı zor problemleri muhasebe alıştırmalarına çevirir: Toplam enerjinin (kinetik artı potansiyel) problemin sonunda, başında olduğuyla aynı olması gerekir, böylece toplamdan nihai potansiyeli çıkardığınızda gende kalan enerji miktarının kinetik enerji olması gerekir.

Enerjinin nasıl işlediğini daha iyi anlamak için somut bir örnek üzerine düşünelim. Havaya atılmış bir top. Herhangi bir kopeğin bildiği gibi yukarıya çıkan şey aşağıya iner, başta herhangi

2. Potansiyel enerjiyi hesaplamak genellikle kinetik enerjiyi hesaplamak tan kolaydır. Potansiyel enerji genellikle etkileşim içindeki nesnelerin konumlarına dayanır. Kinetik enerjiyse hızla hızla, yakın geçmişte olanlara dayanır. Bir enerji problemini çözmenin en kolay yolu genellikle konumu kullanarak potansiyel enerjiyi hesaplamak. Ardından çıkarma yoluyla kinetik enerjiye ulaşmaktır. Örneğin bir lunapark treni yüksek bir tepenin üzerinde durursa bütün enerjisinin potansiyel enerji olduğunu biliriz. Sonra yüksekliği kullanarak potansiyel enerjiyi kolayca hesaplayabiliriz. Bu da arada ne olduğunu bilmeve gerek kalmaksızın kinetik enerjiye ulaşmamızı mümkün kılar.

bir hızla fırlatılmış bir top yavaşlayacak, duracak sonra da düşecektir. Bunu karşı sayfada, topun düzenli aralıklarla ölçülen yüksekliğini gösteren şekilde görebilirsiniz. Yükseklik alçak olduğunda, top hızlı hareket ediyordur; bir tabloda diğerine çok yol alır. Uçuşu sırasında zirveye yaklaştığında çok az hareket eder ve tam zirveye çıktığında bir anlığına durur.

Bu uçuşu enerji bakımından betümlenebiliriz. Fırlatıldıktan bir an sonra top hareket ediyordur, bu yüzden çok fazla kinetik enerjisi vardır; ama yere yakındır ve hiç potansiyel enerjisi yoktur. Dolayısıyla toplam enerji kinetik enerjiye eşittir. Bunu bir kavanoz dolusu ödül gibi bir tür enerji kaynağı olarak düşünebilirsiniz. Şekilde siyah çubukla gösterilmiştir. Top yukarıya doğru hareket ederken kinetik enerjisi azalır (çünkü hızlı hareket etmiyordur) ve potansiyel enerjisi artar (çünkü yerden yüksektedir). Kinetik enerji düzeyi düşer; kinetik enerjinin yerini potansiyel enerji alır (şekilde griyle gösterilmiştir); ama toplam enerji aynı kalır.

Uçuşun zirvesine ulaştığında topun potansiyel enerjisi vardır, ama hiç kinetik enerjisi yoktur; bir saniyenin bir bölümü boyunca hiç hareket etmez. Yere düşerken, aynı süreci tersinden geçirir. Potansiyel enerjisi vardır, hiç kinetik enerjisi yoktur; sonunda kinetik enerjisi olur (başlangıçtaki miktarda), ama hiç potansiyel enerjisi kalmaz.

"Sen bunu tersinden anlamışsın!"

"Yok canım?"

"Eh, tabii ya. Ödül kavanozunun potansiyel enerji olması gerekir, çünkü ödülleri yediğimde bana enerji verme potansiyeline sahiptir. Boş kavanoz da kinetik enerji olmalı, çünkü ödülleri yedikten sonra her yerde koşarım."

"Haklı olabilirsin. Elbette enerjiyi ödüle benzeten bir benzetme hiçbir zaman mükemmel olmayacaktır."

"Nedenmiş o?"

"Çünkü potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirebileceğin gibi, kinetik enerjiyi de potansiyel enerjiye çevirebilirsin. Bu da oduları kavanoza geri koymak gibi olurdu "

"Ah, ben hiç öyle yapmam "

"İnan bana, fark ettük."



Yukarı fırlatılan bir top başlangıçta yukarıya doğru hızla hareket eder, kütleçekim (yerçekimi) yüzünden yavaşlar, geri döner, düşer. Resimler düzenli aralıklarla bakıldığında topun hangi konumda olduğunu göstermektedir. Sütunlar topun enerjisini gösterir, siyah kinetik enerjiyi, gri potansiyel enerjiyi temsil eder. Yere yakinken enerjinin tamamı kinetik enerjidir, uçuşun zirve noktasındayken enerjinin tamamı potansiyel enerjidir.

Uçuş halindeki bir topun enerjisine bakarak enerjinin toplam hareketini sınırladığını da görebiliriz. Top, tümüyle kinetik, topun bir enerjiyle başlar; yukarıya çıktıkça bunu potansiyel enerjiye çevirir. Baştaki kinetik enerji potansiyel enerjiye döndüğünde topun hareketi kesilir. Top belli bir maksimum yüksekliğin üstüne çıkamaz, çünkü bu toplam enerjisinin artmasını gerektirecek-

Sıçrayan

...lan top. evlem  
... bakımından di  
... enerji analizi, e  
... anımlanabilecek  
... karmaşık sistem  
... nin fizikçilerin  
... zardan biri olm  
... kuantum mekan  
... temadır İkinci bol  
... zının iyi tanımla  
... zından de klasik  
... zı surmenin bir y  
... zıdır böylece ku  
... zımlar. Aslına bak  
... zesinin dalga fonk  
... enerjisi kullana

... zının toplam  
... zımların kopuğın  
... zımların. Ama laz  
... zımların. Ama laz

ur ve böyle bir şey de olamaz<sup>3</sup> Belli bir miktar enerjisi olan topun ulaşabileceği yüksekliğe "donum noktası" denir, çünkü bu noktada topun yönü tersine döner. Donum noktasının üstündeki yükseklikler "yasaktır", çünkü topun o yüksekliklere ulaşacak enerjisi yoktur.

### Sıçrayan Dalga Fonksiyonunu İzle: Bir Kuantum Topu

Fırlatılan top, eylem halindeki enerjinin basit bir örneğidir: onu enerji bakımından düşünmek o kadar da yararlı görünmevebilir. Gerçi enerji analizi, enerjiyi kullanarak ancak matematiksel olarak tanımlanabilecek sistemler de dahil olmak üzere, başka birçok karmaşık sisteme uygulanabilir. Bunun sonuçlarından biri, enerjinin fizikçilerin dünyayı anlamak için başvurduğu en önemli araçlardan biri olmasıdır.

Kuantum mekanığından bahsettiğimizde enerji özellikle önemlidir. İkinci bölümde gördüğümüz üzere, kuantum parçacıklarının iyi tanımlanmış bir konumu ya da vonlu hızı yoktur; bu yüzden de klasik bir sistemde yaptığımız gibi bu özelliklerin izini sürmenin bir yolu yoktur. Fakat enerjinin korunumu halâ geçerlidir; böylece kuantum sistemlerini enerjilerine bakarak anlayabilirsiniz. Aslına bakarsanız Schrodinger denklemi bir kuantum nesnesinin dalga fonksiyonuna ne olduğunu o nesnenin potansiyel enerjisini kullanarak bulur, bu yüzden kuantum mekanığının

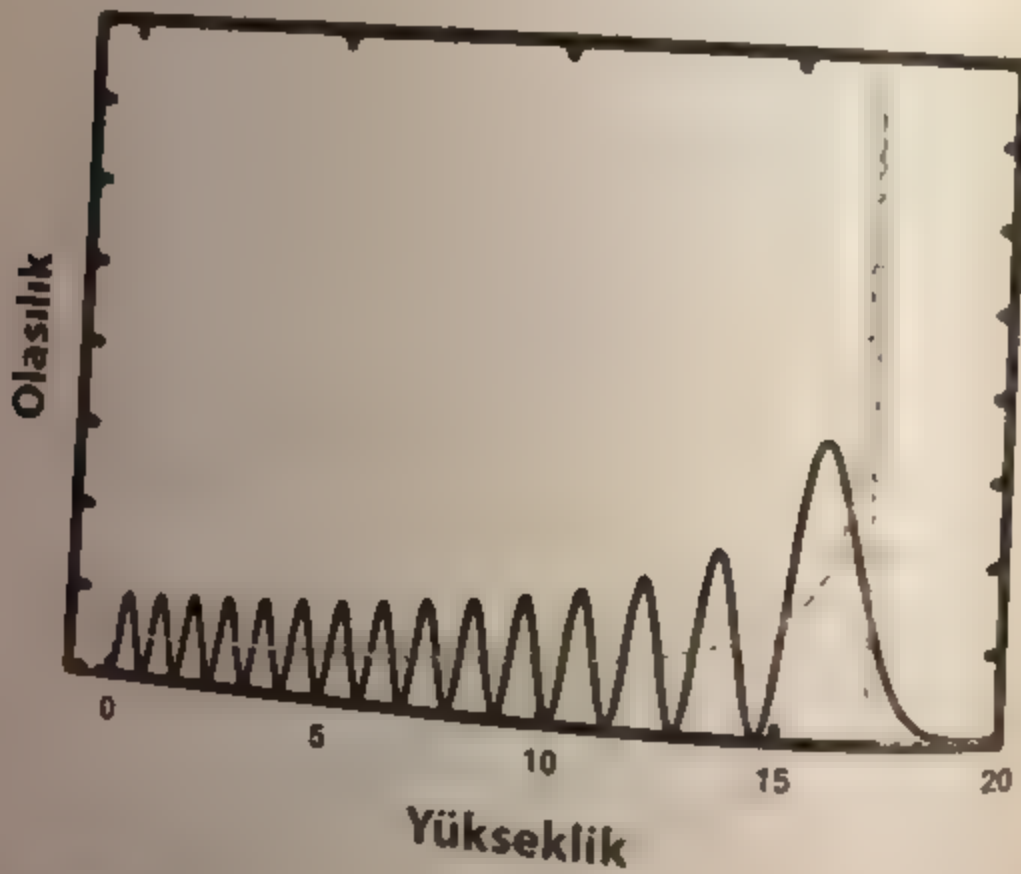
3- Bir nesnenin toplam enerjisi, başka bir kaynaktan enerji ekleyerek artırılabilir, tıpkı köpeğin ödül kavanozunun dost bir insan tarafından doldurulması gibi. Ama fazladan enerji bedavaya gelmez: dış nesnenin enerjisi azalmalıdır, tıpkı ödülleri alabilmek için bir insanın banka hesabındaki paranın azalması gibi. Toplar, köpekler, ödülleri ve insanlar, bütün evrenin toplam enerjisi bir sabittir. Büyük Patlama'dan bu yana geçen on dört milyar yıl içinde de artmamış ya da azalmamıştır.



de yapılan her hesaplama temelde enerjiyle ilişkilidir

Enerjinin dalga fonksiyonlarıyla nasıl ilişkili olduğunu bir kuantum topunun havaya atıldığını düşünerek bulabiliriz. Topun enerjisi hakkında bildiklerimizi paylaşarak dalga fonksiyonunun bazı yönlerine dair ongorülerde bulunabiliriz. Kinetik enerji momentumla benzer, birinci bölümde, momentumun dalga boyunu belirlediğini biliyoruz. Yere yakinken, kinetik enerji yüksekken topun momentumu yüksek, bu yüzden de dalga boyu kısa olmalıdır. Daha yukarıda, top yavaşça hareket ediyorken momentumu düşüktür ve dalga fonksiyonunun da daha uzun bir dalga boyu olması gerekir. Topun dönüm noktasının üstünde olması olasılığının da sıfır olmasını bekliyoruz, çünkü top baştaki enerjisinin mümkün kıldığından daha yükseğe çıkmamalıdır.

Bu sistemin dalga fonksiyonunu hesaplayabiliriz, şuna benzer bir olasılık dağılımı buluruz



Kesintisiz çizgi belli bir yükseklikte bir kuantum parçacığı bulmanın olasılık dağılımını gösteriyor. Kesintili çizgi ise belirli bir parçacığın olasılık dağılımını gösteriyor.

Bu grafiğe baktığımızda az çok, beklediğimiz şeyi görüyoruz. Olasılık dağılımı alçak yükseklikte (solda), yuksekte olduğundan daha hızlı salınıyor. Fakat daha yakından baktığımızda tuhaf bir şey fark ederiz. Olasılık, klasik donum noktasında (kesintili eğrinin sıfırı bulduğu yaklaşık 17 birim yükseklikte) tam olarak sıfır olmaz. Sıfıra düşer, ama donum noktasının üstünde hâlâ ciddi bir olasılığın bulunduğu yükseklikler vardır. Topu, asla ulaşamayacağı yüksekliklerde bulma olasılığı vardır hâlâ!

Olasılık neden tam donum noktasında sıfır olmaz? Eğer ol-  
saydı o noktada dalga fonksiyonunda ani bir değişiklik olurdu. İkinci bölümde öğrendiklerimizden dalga fonksiyonunda ani bir değişiklik yaratmanın, farklı dalga boylarında muazzam sayıda dalga fonksiyonunu birbirine eklemeyi gerektirdiğini biliyoruz. Birçok dalga boyunun olması momentumda büyük bir belirsizlik, dolayısıyla kinetik enerjide büyük bir belirsizlik anlamına gelir. Fakat enerjide büyük bir belirsizlik yoktur, topu ne kadar sert fırlattığımızı biliyoruz. Enerjide küçük bir belirsizlik, dönüm noktasının konumunda büyük bir belirsizliğe yol açar, bu da dalga fonksiyonunda keskin değişiklikler olmayacağı ve bir dalga fonksiyonunun yasak bolgeye doğru genişleyebileceği anlamına gelir.

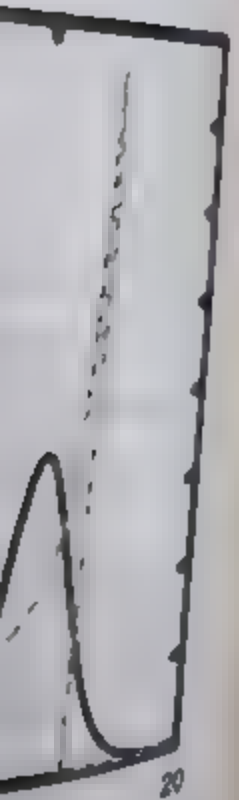
Top hem iyi tanımlanmış bir enerjiye sahip olup hem de klasik fizikğin olması gerektiğini söylediği yerde olamaz. Enerjide küçük bir belirsizlik istiyorsak konumda daha büyük bir belirsizliği kabul etmemiz gerekir, bu da topu klasik fizikğin mümkün gördüğünden daha yuksekte bulma olasılığımız olacağı anlamına gelir.

"Bu kıpırdanmalar zirveye yakinken neden büyüyor?"

"Bunu söyledim zaten. Top daha yavaş hareket ediyor, bu yüzden de dalga boyları uzuyor."

"Evet, ama daha da yüksek oluyorlar."

"Ha şu mesele. Bunun sebebi de topun yavaşlaması. Top, uçuşunun tepe noktasına yakinken, yavaş hareket ediyorken, yere



vakarken hızla hareket ediyorken harekadığından daha fazla za  
man harcıyor. Olasılık dağılımını inceliyorsa aynı şeyi klasik top  
ta da görürsün. Kesinli egride yani."

"Bir dakika bir dakika. Topun en olası konumu yukarıda ol  
ması mı var?"

"Hi hi. Bir önceki sayılda topu uçarken gösteren şekle ba  
karsan görebilirsin. Topun yuksekte çekilmiş fotoğraflarının sa  
yıst. atmakta çekilmişlerden fazladır. Atmaca-kapmaca oynarken  
topu genellikle uçuş sırasında yuksekteyken vakalamamanın sebe  
bi de bu. Çok hızlı hareket etmiyor, o yüzden vakalaması kolay."

"Yakalamakta ustame yoktur. Aaa! Atmaca-kapmaca oynama  
ya gidelim! Çok eğlenceli!"

"Bu bölümü bitirelim de öyle, olur mu?" Tunellemeden Jaha  
bahsetmedim."

"Ah, peki. Tunellemeden bahsedelim. Katı nesnelerin içinden  
geçmek atmaca kapmacadan daha zevkli."

"Fazla umutlanma canım..."

## Hiç Orada Yokmuş Gibi: Engellerin İçine Girme ve Tünelleme

Dönüm noktasındaki belirsizlik nasıl olur da parçacıkların katı  
nesnelerin içinden geçmesine yol açar? Katı bir nesnenin içi va  
sak bölgedir, iki nesneyi oluşturan atomlar arasındaki etkileşim  
ler bir nesnenin diğerinin içinde olması durumunda potansiyel  
enerjiyi muazzam boyutlara çıkarır. Zaten huysuz bir kopeğin  
bulunduğu bir kulubeve ikinci bir kopek bağlamaya benzer bu  
biraz, ikinci kopeği oraya sokmanız zor olacaktır, soktuğunuz  
da da muazzam bir fazladan enerjiyle karşılaşacaksınız, hırlamalar  
havlamalar, çaurtılar biçiminde

Fakat kuantum mekaniğinde dalga fonksiyonları vasak bölge

lere girebilir ve bu katı nesnelerde bile söz konusu olabilir, küçük de olsa bir nesneyi diğerinin içinde bulma olasılığı vardır. Dahası, yasak bölge çok darsa kuantum mekaniği bir nesnenin, bırakın öbür tarafa geçmeyi, yasak bolgeye girmeye yetecek kadar enerjisi olmasa bile başka bir nesnenin içinden geçebileceği öngörüsünde bulunur.

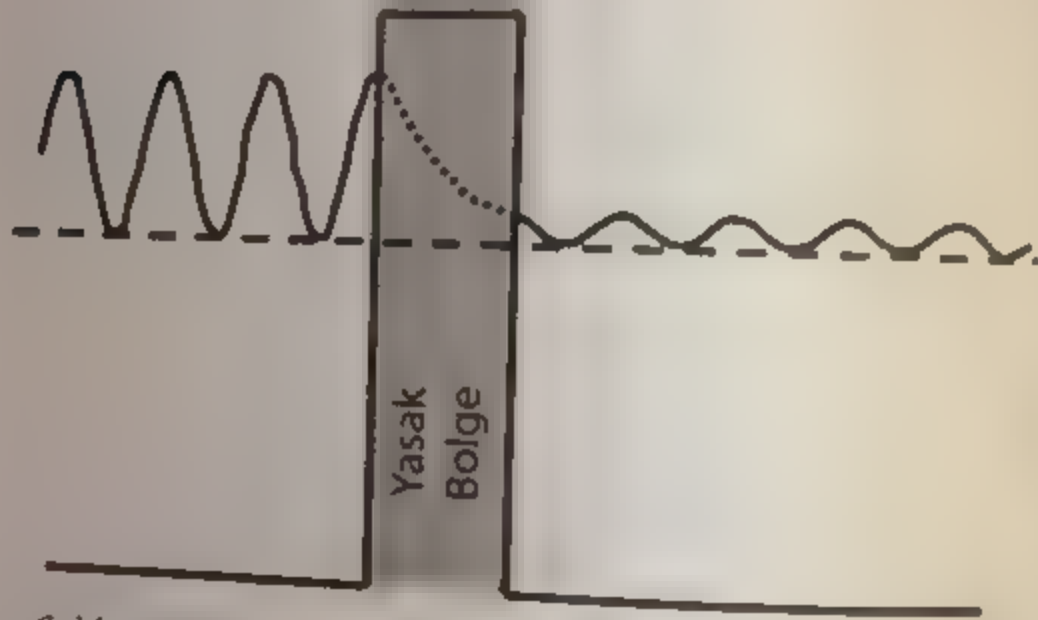
Bunun en basit örneği, bir elektronun, potansiyel enerjisi onunkinden çok daha fazla olan ince bir metal parçasına çarpmasıdır. Klasik fizik bize, elektronun metalin dışındaki kinetik enerjisinin, metalin yakınına geldiğinde neler olacağını belirlediğini söyler. Elektronun kinetik enerjisi metalin potansiyel enerjisinden büyükse enerjisinin büyük bölümü potansiyele dönebilir ve yine de metalden uzaklaşmaya yetecek kinetik enerjisi olabilir. Metalin dışındaki elektronun kinetik enerjisi metaldeki potansiyel enerjiden azsa elektronun toplam enerjisini artırmadan metalin içine girmesinin bir yolu yoktur. Metalin kenarı dönüm noktası haline gelir, metal de yasak bolgedir. Soldan gelen bir elektron yüzeye çarpar ve geldiği yere geri döner. Sağdan gelen bir elektron metalin öbür yüzüne çarpar ve aynı şekilde geri döner.

Oysa kuantum mekaniğine göre, metalin kenarında keskin bir dönüm noktası olamaz. Yukarı fırlatılmış top örneğinde olduğu gibi, elektronun dalga fonksiyonu, potansiyel enerjinin gelen parçacıkların kinetik enerjisinden daha fazla olduğu yasak bölgeye doğru ilerler. Klasik fizik yasak olduğunu soylese de metalin içinde elektron bulma olasılığı vardır. Yasak bolgede parçacık bulma olasılığı metalin kenarının yakınlarında en yüksek düzeydedir, metalin içinde ilerledikçe bu olasılık hızla azalır. Yasak bölge yeterince uzun bir mesafeye uzanıyorsa olasılık sıfıra düşer ve bu da her şeyin sonu olur<sup>4</sup>.

4- Kesin bir ifadeyle, olasılık hiçbir zaman tam olarak sıfır olmaz; bu olasılığı belirleyen matematiksel fonksiyon bir üslü sayıdır ve elektron engelin içinde hareket ederken sıfıra yaklaşırsa da hiç sıfıra ulaşmaz. Kuan-



Fakat çok dar bir engel söz konusu olduğunda elektronlar girdikleri yasak bölgenin öbür ucunda bulma olasılığı mevcuttur. Bu noktanın ötesinde, artık orada olmaları yasak değildir, yani boş uzaydadırlar ve başta sahip oldukları enerjiyle hareket ederler. Denevi izleyen biri, diyelim ki gelen bir milyon parçacıkta, çok küçük bir kısmının, sanki orada yokmuş gibi engelin içinden geçtiğini görecektir. Buna tünelleme denir, çünkü elektronlar onlar için imkansız olsa da yasak bölgeye girmişlerdir. Bu anlamda, tıpkı bir çitin altından tunnel kazan bir köpek gibi, engelin altından geçmişlerdir.



Soldan gelen bir elektron için olasılık dağılımı, elektron engeli çarpar, burada bir elektronun potansiyel enerjisi elektronumuzun toplam enerjisinden fazla olur. Olasılık yasak bölgenin içinde hızla düşer, ama sifıra ulaşmaz. Bu yüzden de elektronumuzu engelin sağ tarafında bulma olasılığı hâlâ vardır.

tum fizığı, havaya fırlatılan bir topun, klasik fizığe göre çıkabileceği azami yükseklikten başlayıp A'ya varan yasak bölge tunnelinden geçmesi ve nandedi çok küçük bir olasılık bulunduğunu öngörür. Fakat bu çok da iyi bir tahmin değildir. Bu olasılık o kadar küçüktür ki pratik amaçlarla bakıldığında sıfırdan farkı yoktur.

Bu durumun dalga fonksiyonu yukarıda gösterilmiştir Solda, bir momentumu ve enerjisi olan, dalga boyu iyi tanımlanmış bir dalga boyuyla<sup>5</sup> temsil edilen, gelen bir elektron vardır. Elektron metalin kenarına geldiğinde, yasak bolgeye girer ve olasılık hızla artar. Yasak bolgenin sağ kenarına varmadan olasılık sıfır olmaz, bu yüzden de oradan, soldakiyle aynı dalga boyunda bir dalga olarak çıkar.

Barьерın sağındaki dalganın yüksekliğinin daha az olması, elektronu sağda bulma olasılığının solda bulma olasılığından düşük olduğunu gösterir. Engelin kalınlığı arttıkça, tünelleme olasılığı da katlanarak azalır, kalınlığı iki katına çıkarırsanız olasılık baştaki olasılığın yarısından çok daha az olur. Öte yandan gelen elektronların enerjisi arttıkça yasak bölgede daha fazla ilerlerler; içlerinden birinin bütün yolu aşma olasılığı artar.

"Yani elektronlar engelde delik mı açıyor?"

"Hayır, sanki orada değilmiş gibi içinden geçiyor. Delip geçecek kadar enerjileri yok."

"İyi de bunu nasıl yapıyorlar?"

"Bak şimdi elektronlar engelin obur ucunda, ona çarpmadan önceki enerjisiyle beliriyor. Engelin içinde küçük delikler açıyor olsalardı bu süreçte enerji kaybederlerdi, biz de bunu tespit edebilirdik."

"Belki de gerçekten çok küçük deliklerdir, ha?"

"Hayır. Bunu taramalı inceleme mikroskopuyla görebiliriz, delik falan yok."

"Taramalı inceleme mikroskobu da neyin nes?"

"Mukemmel, gayet yerinde bir soru."

5- Konumundaki belirsizliğin çok büyük olduğuna dikkatınızı çekirim. Elektron yasak bolgenin solunda herhangi bir yerde olabilir.

## Tek Tek Atomları Hissetmek: Taramalı Tünel Mikroskopisi

Tunellemenin, tartıştığımız diğer tuhaf kuantum fenomenlerinin çoğuna nazaran daha doğrudan bir teknolojik uygulaması vardır. Tunelleme taramalı tunelleme mikroskobu (scanning tunneling microscope/STM) denilen, tek tek atomlar kadar küçük nesnelerin görüntülerini almak için elektron tunelini kullanan bir aygıtın temelini oluşturur. Taramalı tunelleme mikroskobu 1981'de IBM Zürih'te geliştirilmiş, katı maddelerin atomik yapısını inceleyen insanlar için temel önemde bir aygıt haline gelmiştir. Müccitleri Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer 1986'da Nobel Fizik Ödülü kazanmıştır.

Bir STM, elektrik ileten bir maddeden ve bu maddenin yüzeyinin birkaç nanometre içine sokulan çok sıvırı metal bir uçtan oluşur. Uç ileten malzemeden biraz daha farklı bir voltajda bulunur, bu yüzden de uçtaki elektronlar ileten malzemeye geçmek ister. Ama elektronlar uçtan ileten malzemeye doğrudan akamazlar; çünkü sıvırı uç ile ileten malzeme arasındaki küçük açıklık elektronların hareketini engelleyen bir bariyer gibi hareket eder.

Metal uç ile iletken malzeme arasındaki mesafe yeterince azsa, örneğin bir nanometre kadarsa elektronların metal uçtan malzemeye doğru tunelleme yapması olasılığı vardır. Bu, ölçülebilen küçük bir akım oluşturur. Tunelleme olasılığı (dolayısıyla da akım oluşması olasılığı) metal uç, iletken maddenin yüzüne yaklaştıkça ciddi biçimde artar; böylece akımdaki değişiklikler ikisi arasındaki mesafede meydana gelen ufak değişiklikleri bir tek atomun çapından daha küçük değişiklikleri tespit etmek-

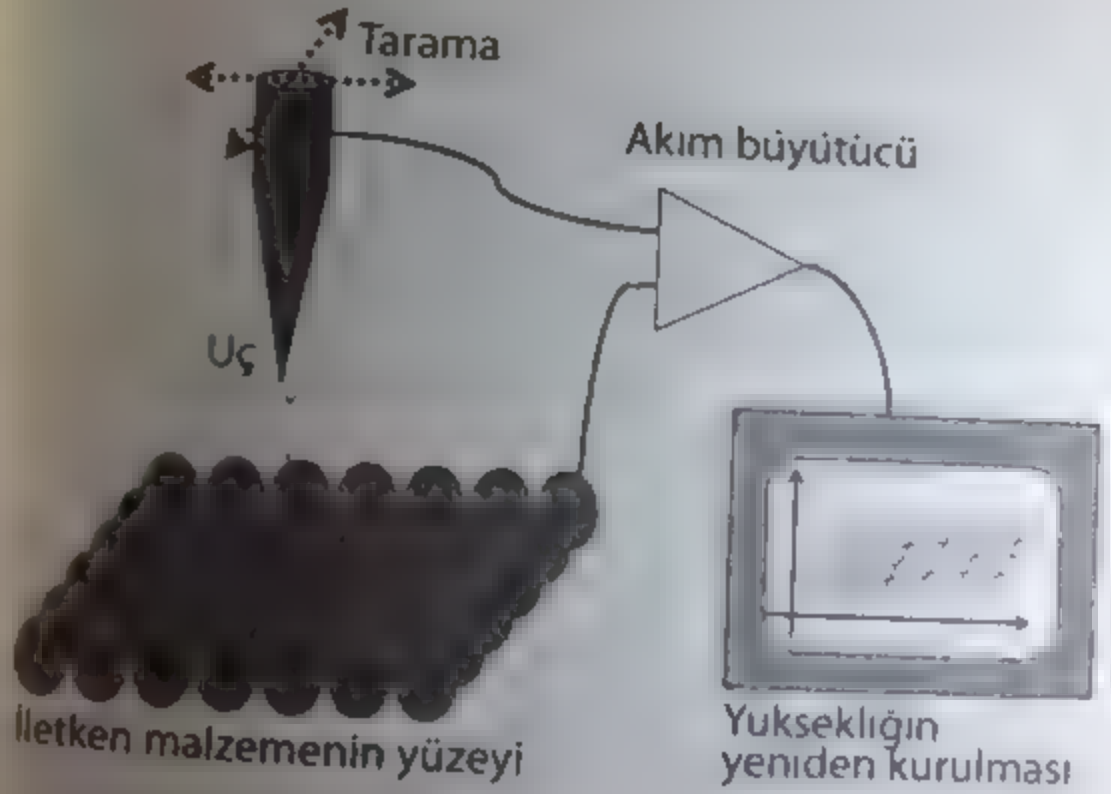
6- Bir potansiyel enerji barınmasının katı bir fiziksel nesne olması gerekmez. Bir hava boşluğu da pekala aynı işi görür. Bir ampulu lambada çirilmesi gereken yerin yakınında tutarak yanmasını sağlayamamanızın sebebi de budur.



...mal tunnellem  
...marzemenin y  
...mar deni geri  
...arandaki  
...yarıyarabli

te kullanılabilir.

Bir STM ile bir görüntü yaratmak, parmağınızı bir yüzeyde gezdirmeye, girintileri, çıkıntıları hissetmeye benzer. Metal ucu, yüksekliğini sabit tutarak iletken malzemenin yüzeyi üzerinde ileri geri gezdirirsiniz, metal ucu hareket ettirirken uç ile iletken malzeme arasında oluşan elektrik akımını gözlersiniz. Yüzeyde, elektronların tünel açmalarını kolaylaştıracak küçük bir çıkıntı olduğunda akım artar, küçük bir girinti olduğunda da akım azalır. Bir ızgara üzerinde çeşitli noktalarda çok sayıda yükseklik ölçümü alırsanız, bunları bir araba getirerek iletken malzemenin yüzeyini oluşturan tek tek atomların görüntüsünü oluşturabilirsiniz.



Taramalı tünelleme mikroskopunun bu grafiği. Keskin uç bir malzemenin yüzeyine yakın konumdadır ve düzenli bir biçimde ileri geri hareket ettirilir. Uçtaki elektronlar, uç ile yüzey arasındaki açıklıkta tünel açacak küçük bir elektrik akımı yaratacaklar, bu akım büyütülüp ölçülecektir. Akım miktarı, metal uç ile yüzey arasındaki mesafeye çok duyarlıdır, bu da yüzeyin tek tek atomların tespit edilebileceği bir duyarlılıkla yeniden kurulmasını mümkün kılar.



Tek tek atomları görmekle kalmazsınız, metal ucu, iletkin malzemenin yüzeyiyle doğrudan temasa sokarsanız tek tek atomları etrafa ıtersınız. Bilim insanları bu beceriyi birkaç tane inanılmaz yapı elde etmek için kullanmışlardır, IBM'in Almaden araştırma laboratuvarında yapılan, sonraki sayfadaki resimde gördüğünüz oval şekilli "mercan" gibi "Mercean"ı oluşturan çıkıntılar bakır bir yüzey üzerindeki tek tek atomlardır, STM'yle o yerlere getirilmişlerdir. Bu gibi yapılar "mercan"ın içindeki elektronların kuantum davranışlarını incelemekte kullanılabilir, bakır yüzeyin üzerinde görülen dalgalar, elektronların kuantum davranışlarıyla açıklanır.

Taramalı tunelleme mikroskopları katılar ve katıların yüzeylerine ilişkin incelemelerde devrim yaratmışlardır, bu teknoloji küçük aygıtlar ortaya çıkaracak yeni imalat tekniklerine doğru ilerleyebilir. Bazı bilim insanları bu mikroskopları tek tek DNA şeritlerini inceleyip yönlendirmekte kullanmış; genetik malzemenin davranışına dair daha ayrıntılı bir kavrayış kazanmış genetik hasar için muhtemelen yeni ilaçlara, yeni tedavilere ulaşmışlardır. Bunların hepsi maddenin dalga niteliği sayesinde mümkün olmuştur.

"İyi güzel de mikroskobik tavşanlarla ilgilenmiyorum ben. Kuantum tunellemesi benim için ne yapmış ki?"

"Öncelikle tunelleme olmasaydı güneşli güzel bir günün tadını çıkaramazdın."

"Ne demek istiyorsun?"

"Güneş, çekirdeğindeki füzyon tepkimeleri yüzünden patlıyor değil mi?"

"Bunu herkes bilir. Caddenin aşağısındaki o küçük tazi bile bilir, hem o gerçekten de ahmak bir köpek."

"Evet. Her neyse, füzyon protonların birbirine yapışıp hidrojen den helyum üretmesiyle işler. Protonlar arı vuklu oldukları için birbirlerini iterler, bu mış bir engel oluşturur. Güneş ne ka

dar sıcak olursa olsun, Güneş'teki protonların bu bariyeri doğrudan aşmalarını sağlayacak kadar enerjileri yoktur."

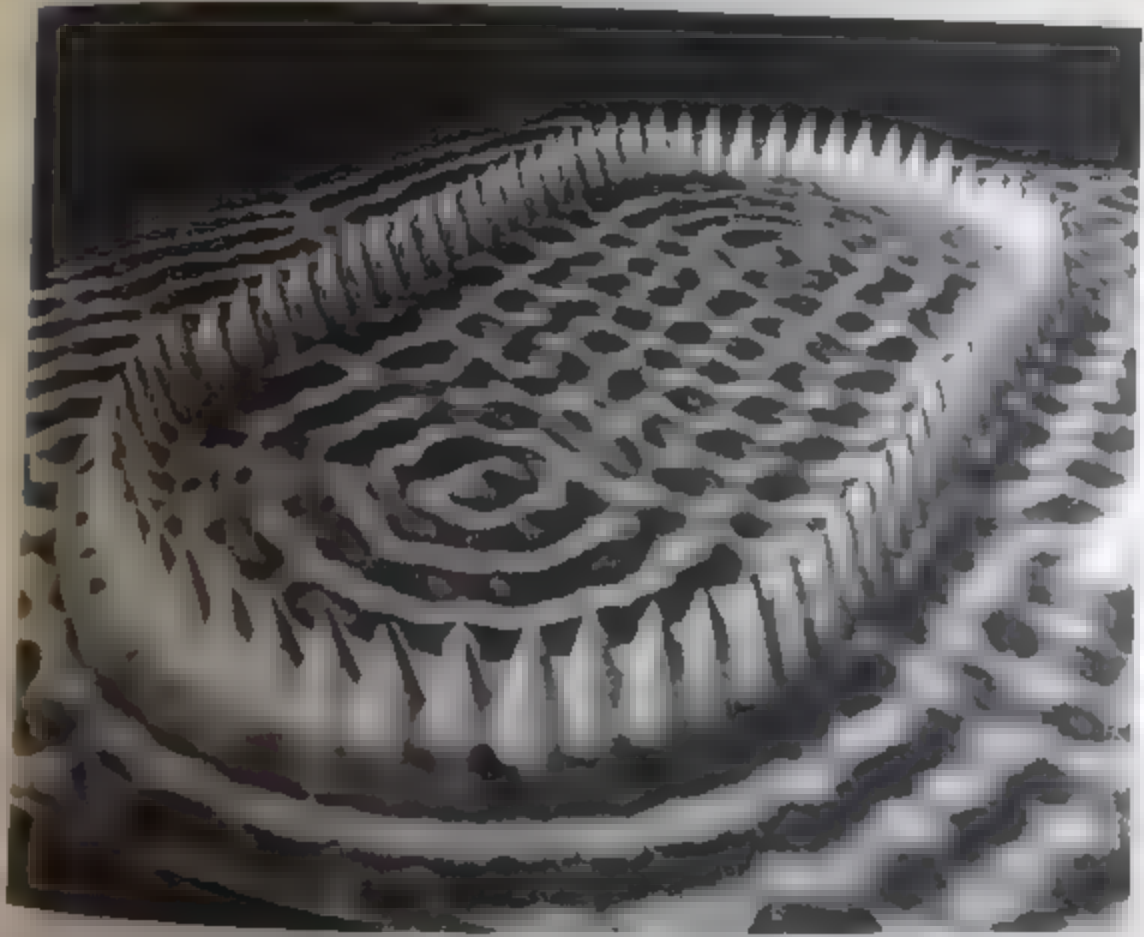
"Tunelleme mi yaparlar yani?"

"Kesinlikle. Bir protonun o bariyeri tunelleme olasılığı çok düşüktür ama Güneş'te çok çok çok fazla proton vardır, yeterli miktarda proton tunellelemeyle tepkimenin sürmesini sağlar. Yani Güneş'in parlamasını sağlayan şey aslında tunelleme."

"Hmm. Vay be, çok iyymiş."

"Onayladığına çok sevindim."

Aımaca kapmaca oynayabilir miyiz şimdi?"



Bakır bir yüzeyin üzerinde bu STM kullanarak "mercan" şeklinde düzenlenmiş demir atomları. Mercanın üç kısmındaki dalga örüntüsü, bakır yüzey üzerindeki elektronların dalga niteliğinden ileri gelir. Görüntü, IBM'in izniyle yayınlanmıştır.

## VII

### Uzakta Tekinsiz Bir Havlama: Kuantum Dolaşıklığı



Emmy oturma odasında kestiriyor, ama ben oradan geçerken uyanıyor. Geniş geniş geriniyor, sonra da kendinden memnun peşimden mutfaga geliyor "Bir tavşan ölçeceğim," diyor

"Efendim?" Hep böyle tuhaf şeyler söylüyor

"Bir tavşanın hem konumunu hem momentumunu nasıl ölçeceğimi buldum "

"Buldun ha? Nasıl yapacaksın bunu?"

"Bak, arka bahçeye büyük bir ızgara çizeceğim, sonra da tavşan çizgilerin kesiştiği bir noktada durduğunda tek yapmam gereken ne kadar hızlı gittiğini ölçmek olacak " Gururla kuyruğunu sallıyor. "Belirsizlik, melirsizlik "

"Hı hı Pekı, tavşanın kesişim çizgisinde olduğunu nasıl ölçeceksin?"

"Ne demek istiyorsun? Sadece bakacağım "

"Tabii ya. Bu da demektir ki tavşanı göreceksin, o da seni görecektir, sonra da kaçmak için hızını değiştirecek "

"Haa..." Kuyruğu düşüyor. "Bu aklıma gelmemişti "

"Bak, burayı geçtik. Belirsizlik ilkesini aşmanın bir yolu yok Gerçekten akıllı insanlar bir yolunu bulmaya çalıştılar, ama yapı-

lamıyor Einstein yıllarca Niels Bohr'la bunu tartıştı "

"Bir şey çıkardı mı bari?"

"Bir sürü farklı arguman geliştirdi; ama hiçbiri gerçekten işe yaramadı. Kuantum mekanığının, durumları birbirleriyle ilişkili olsun diye hazırlanmış iki dolanık parçacığı gerektirdiği için eksik olduğu yolunda gerçekten akıllıca bir arguman bile ileri sürdü "

"Nasıl ilişkili?"

"Şimdi diyelim ki elimde iki ödül var, salya akıtmayı kes, bir düşünce deneyi bu, biri biftek, diğeri de tavuk bu ödülleri "

"Bifteğe bayılırım Tavuğu çok severim." Salyaları akıyor yere

"Evet, biliyorum Düşünce deneyi, hatırladın mı?" Bir parça kağıt havlu alıp yeri siliyorum "Şimdi, diyelim ki bu iki ödülü ters yönlerde fırlatıyorum, birini sana, birini de başka bir köpeğe "

"Sakin yapma Başka köpekler ödüle layık değil."

"Varsayımsal olarak diyorum, takip etmeye çalış Bifteği aldığında biliyorsun ki obür köpek de tavuğu aldı. İyi de neden öyle üzgün görünüyorsun bakayım?"

"Varsayımsal ödül tavukları seviyorum ben."

"Sen de varsayımsal ödül biftek aldın ya!"

"Ooo! Varsayımsal bifteğe bayılırım."

"Mesele şu. Hangi ödülü aldığını ölçmekle, diğer ödülün ne olduğunu onu ölçmene gerek kalmadan biliyorsun."

"Ha, öyle mi? Bunda tuhaf ne var şimdi?"

"Bak şimdi, kuantum versiyonunda, parçacıkların durumu, birinden biri ölçülene kadar belirsizdir Ödülleri fırlattığımda birini alıp biftek mi tavuk mu anlamadığın surece ikisi de değildir Bir anlamda ikisi birdendir "

"Tavukbiftek! Biftektavuk! Bifvuk!"

"Saçmalıyorsun Her neyse, Einstein bunun bir sorun olduğunu düşünmüştü, bir parçacığın durumunu diğerini ölçerek tahmin edebilecek olmanın, her ikisinin de her zaman belli durumları olması gerektiği anlamına geldiğini söylüyordu "



"Anlaşılmaz bir şey."

"Klasik bir dünyada, kesinlikle. Ama Einstein'ın argümanı boş çıktı, çünkü "yerellik" denilen şeyi, bir parçacığı ölçmenin değerini etkilemeyeceğini varsaymıştı. Aslına bakarsan birinin halını ölçmen değerinin halını mutlaka ve anında belirler."

Bundan gerçekten sıkılmış görünüyor. "Ben bu fikri sevmeyim. Bir ödulden diğerine mesaj gitmesi gerekmez mi bu durumda?"

"Einstein'ın canını sıkan da buydu ve buna *Spukhafte Fernwirkung* diyordu."

"Uzakta tekinsiz eylem mi yanı?" diye çeviriyor.

"Sen ne zamandan beri Almanca biliyorsun bakalım?"

"Ahbap, bir bak bana." Şöyle bir yan dönüyor, siyah-ten rengi tuylerini ve sivri burnunu gösteriyor. "Alman çoban köpeği, hatırladın mı?"

"Tabii ya, ne aptalım. Her neyse, evet bu Einstein'ın da canını sıkıyordu; çünkü enformasyon iki ayrı nesne arasında ışık hızından hızlı yol alamaz. Ama kuantum mekaniği yerel değildir, dolanık parçacıklar da tek bir nesne gibi davranır. John Bell diye bir adam, parçacıkların belli, kesin durumlarda sahip olduğu kuramlarda, ölçülebilecekleri sınırlamanın mümkün olduğunu, bu sınırların, dolanık kuantum parçacıkları için geçerli sınırlardan farklı olduğunu göstermişti. İnsanlar deneyler yapıp kuantum kuramının doğru olduğunu gördü. Parçacıkların durumu gerçekten de ölçülünceye kadar belirsizdir."

"Yani Einstein yanıliyordu?"

"Bu konuda, evet. Genel olarak kuantum kuramının temeli hakkında yanıliyordu."

"Ama gerçekten de akıllıydı, değil mi?"

"Evet. Einstein kesinlikle Bohr'dan daha zekiydi. Ama bütün tanışmaları Bohr kazandı, çünkü haklı olmanın avantajına sahip."

"Eğilip kulaklarının arkasını kaşıyorum. "Sen de çok zekisin,

ama Einstein değilsin "

"Ama ben köpek Einstein gibiyim, ha?"

"Kesinlikle Bildiğim kadarıyla sen köpek dünyasının Einstein'ısın "

"O zaman biraz biftek alabilir miyim ya da tavuk?"

"Olabilir " Tezgahın üzerindeki kavanozdan bir ödül alıyorum "Ne olduğunu ölçünce anlayacaksın." Ödülü arka kapıya doğru fırlatıyorum, o da arkasından fırlıyor.

"Ooo! Belirsiz ödüller!"

Şimdiye kadar bahsettiğimiz her şey, tek parçacıklı fenomenlerdi. Etkilerin görülebilmesi için çoğu deneyin, aynı şekilde hazırlanmış farklı parçacıklar kullanarak birçok kez tekrarlanması gerekmiştir, ama temelde bahsettiğimiz bütün girişim, kınılma ve ölçüm etkileri bir seferde tek bir parçacıkla işler. Bir girişim deneyindeki her bir parçacık kendisiyle girişiyormuş gibi düşünülebilir; kuantum Zeno etkisi gibi ölçüm fenomenleri de tek bir parçacığın haliyle ilgilidir.<sup>1</sup>

Elbette ki içinde yaşadığımız dünyada çok fazla sayıda parçacık bulunuyor: bu yüzden de kuantum fizikini birden fazla parçacık içeren sistemlere uyguladığımızda neler olduğuna bakmamız gerek. Baktığımızda da hiç şaşırtıcı olmamakla birlikte bazı tuhaf şeyler olduğunu görüyoruz. "Dolanık durumlar" fikrinden başlayarak.

Bu bölümde durumları birbirıyla ilişkili parçacıkları, bir parçacığı ölçmenin, öburunun kesin durumunu belirleyeceği "dolanık" parçacıklar fikrini inceleyeceğiz. Dolanık parçacıklar, Einstein'ın kuantum kuramının karşısına çıkardığı, Einstein, Podolsky ve Rosen (EPR) Paradoksu olarak bilinen en ciddi güçlüğü temelinde yatar John Bell'in bu paradoksu çözen meşhur

1 Dördüncü bölümde anlatılan uyum bozulması süreci, tek bir kuantum parçacığının daha geniş bir çevreyle etkileşime girmesini gerektirir, ama biz sadece parçacığın durumuyla ilgileniyoruz.

147  
kuramından, bu kuramın, gerçeklikle ilgili genel bakış açısı üzerindeki rahatsız edici etkilerinden bahsedeceğiz. Son olarak da Bell'in kuramını kanıtlayan deneylere değinip fizikçilerin zorla yeni fikirlerde nelerle uzanabildiğini göstereceğiz.

## Uyuyan Köpekler Birbirinin Yalan Söylemesine İzin Verir:

### Dolanıklık ve Korelasyonlar

Dolanıklık temelde, iki nesnenin durumları arasındaki karşılıklı ilişkilerle ilgilidir. Bu fikri örneklemek için iki köpek düşünelim, biz annemlerin Labrador retriever'i RD ile kayıvalıdemlerin Boston terrier'i Truman'ı düşüneceğiz, her biri, iki durumdan birinde olabilir ya "uyanık" ya "uykuda" köpekler birbirlerinden tamamen ayrılmışlarsa iki köpekli sistemimizi bulabileceğimiz dört durum vardır: ikisini de uyanık bulabiliriz, ikisini de uyku da bulabiliriz; Truman'ı uyanık, RD'yi uykuda ya da Truman'ı uykuda, RD'yi uyanık bulabiliriz.

İki köpeği bir araya getirip etkileşim kurmalarına izin verdiğimizde iki köpeğin durumları arasında bir korelasyon (uyumlu ilişki) gelişir. RD uyanıkken Truman uyuyorsa RD Truman'ı birlikte oynasınlar diye uyandıracaktır, aynı şey tersi için de geçerlidir. Ya ikisi birden uyanık ya ikisi birden uykuda olur biri uyanık biri uykuda olmaz. Dört olası hal sadece ikiye iner.

Ustelik bu korelasyon köpeklerden birinin halini ölçmeden bilmemizi sağlar. Truman uyanıkrsa RD'nin de uyanık olması gerektiğini biliriz, Truman uyuyorsa RD de uyuyor olmalıdır. İstersek RD'ye de bakabiliriz, ama baktığımızda sadece bildiğimiz bir şeyi doğrulamış oluruz. İki köpekten birinin halini ölçmek diğer köpeğin halini anında ve mutlak bir kesinlikle bildirir.

## Kuantum Mekanik Eksi mi?

### Einstein, Podolsky, Rosen Argümanı

Peki, bunun Einstein'la ne alakası var? Einstein, nedenden sonuca doğru her zaman açık bir yol izleyebileceğimiz belirlenimci evrene kuvvetle inanıyordu. Kuantum mekanik ile büyük felsefi sorunları vardı. Özellikle de kuantum parçacıklarının özelliklerinin ölçülünceye kadar belirsiz olması, sonra da rastgele değerler alması fikri onu çok sıkıyordu.

Einstein 1920'lerin sonundan 1930'ların ortalarına kadar kuantum kuramını güçlü bir biçimde savunan, felsefeye de eğilimli olan<sup>2</sup> Niels Bohr'la bir dizi tartışmaya girdi. Einstein önce, belirsizlik ilkesinin yasakladığı ölçümleri gerçekleştirecek, örneğin bir elektronun hem konumunu hem momentumunu ölçecek usta işi birkaç deneyle belirsizlik fikrine saldırdı. Bunu her yaptığında Bohr, Einstein'ın önerdiği deneyin gizli bir kusuru olduğunu gösteren yeni klasik bir karşı argüman buldu.<sup>3</sup>

1930'ların başında Einstein kendini belirsizliğe alıştırdı; ama kuantum kuramı onu hâlâ rahatsız ediyordu, o da saldırarak yeni bir problem buldu. Mevcut kuantum kuramının bir parçacığın özelliklerini tanımlamak için gerekli bütün bilgiyi içermediğini ileri sürdü. Einstein ile meslektaşları Boris Podolsky ve Nathan Rosen "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekanikine Dayalı Betimlemesi Eksiksiz Sayılabilir mi?" başlıklı 1935 tarihli bir makale-

2- Bohr'la çalıştığı sırada belirsizlik ilkesini geliştirmiş olan Werner Heisenberg Bohr'u "esasen fizikçi değil, filozof" diye tanımlamıştı.

3- Bu örneklerin hepsinde Bohr'un argümanı, sistemin ölçülmesinin yaratacağı etkiye dayanıyordu. Süreçte, Einstein'ın konumu ölçmek için önerdiği bir şey momentumda bir değişikliğe yol açacaktı (ikinci bölümde tartıştığımız Heisenberg mikroskobu düşünce deneyinde olduğu gibi) ya da momentumu ölçmek için önerdiği bir şey konumu değiştirecekti. Sistemin ölçülmesi bir etkileşim gerektirir ve bu etkileşim de sistemin halini, ölçülen niceliklerde bir belirsizliğe yol açacak şekilde değiştirir.



de dolanık durum fikrini kullanarak bu iddiayı destekleyen da  
hane bir argüman ortaya koydular. İleri sürdükleri bu eksik-  
liğin göstermek için iki parçacığın hallerinin dolanıklaştırılmasını,  
sonra parçacıkların ayrılmasını, artık etkileşim içinde olmama-  
larını (ama hallerinin değişmemesini) öngören bir deney önerdi.  
Her birini etkilemesi mümkün olmayan ayrı deneylerle bu iki  
parçacığı ölçüp neler olduğunu görebilirdiniz.

EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) grafiğine göre, iki parçacık-  
tan birinin (A parçacığının) konumunu ölçmek diğerinin (B par-  
çacığının) konumunu mutlak bir kesinlikle tahmin etmenizi sağ-  
lar. Aynı zamanda, B parçacığının momentumunu ölçerseniz, A  
parçacığının momentumunu kesinlikle bilirsiniz. Einstein, Po-  
dolsky ve Rosen'a göre, A parçacığının B parçacığıyla ilgili ölçü-  
mün sonucunu etkilemesi ya da tersi mümkün olmadığından her  
bir parçacığın hem konumunun hem momentumunun her za-  
man kesin değerlere sahip olması gerekiyordu. Bu da kuantum  
mekanığının eksik olduğunu düşündürür. Parçacıkların kesin  
durumunu belirlemek için gereken bilgi vardır, ama kuantum  
kuramı bu bilgiyi yakalayamamaktadır.

"Ben de aynen böyle diyordum işte!"

"Ne diyordun?"

"Bir tavşancığın da belli bir konumu ve momentumu vardır.  
Butün bu belirsizlik lafları sırf senin her şeyi birbirine karıştır-  
man yüzünden."

"İkna edici bir argüman gibi geliyor, ama hatırlarsan bunun  
yanlış olduğunu da söylemiştim. Parlak bir hata, ama hâlâ bu fi-  
zikçilerin varsayımlarının birinde bir hata var; daha açık söyler-  
sem, bir parçacığı ölçmenin diğer parçacığın durumunu etkile-  
mesinin mümkün olmadığı fikri hatalı."

"Yok artık! Kanıtla da görelim."

"Hemen kanıtlayacağım. Bir dakika..."

## "Bilmiyorum"a Karşılık "Bilemiyorum": Yerel Gizli Değişkenler

Bohr'un EPR argümanına verdiği ilk yanıt aceleyle gelmişti ve ne rededise hiç anlaşılmıyordu.<sup>4</sup> Bu argümanı daha sonra geliştirip inceltti. Fakat Einstein'la girdiği diğer bütün tartışmalarda yaptığı gibi ikna edici bir yanı klasik argüman çıkarmayı başaramadı. Bunun sebebi basitti. Böyle bir argüman yoktu. Kuantum mekaniği "yerel olmayan" (nonlocal) bir kuramdır, bu da çok uzun mesafelerle ayrılmış ölçümlerin birbirlerini klasik fizik'in mümkün görmeyeceği biçimlerde etkileyebileceği anlamına gelir.

Einstein, Podolsky ve Rosen'in tercih ettiği kurama, modeli oluşturan temel varsayımlardan hareketle yerel gizli değişken kuramı denir. "Gizli değişken" ölçülebilen bütün niceliklerin kesin değerleri olduğu, ama bu değerlerin denevi yapan insanlara bilinmediği anlamına gelir. "Yerel" uzayın bir noktasındaki ölçümler ve etkileşimlerin, ancak o noktanın yakın çevresindeki şeylerin anında etkileyebileceği anlamına gelir. Uzun mesafeli etkileşimler mümkündür, ama bu etkileşimlerin biraz zaman alması ve ışık hızına yakın ya da ondan biraz daha az bir hızla diğer tarafa iletilmesi gerekir.<sup>5</sup>

Yerellik klasik fizik açısından o kadar merkezi bir önemdedir ki karşı çıkılamayacak kadar aşıkarmış gibi görünebilir. Ye-

4- Bohr biraz kapalı yazım tarzıyla meşhurdur, ama bu örnekte kendi kendisini aşmıştır. Makalesinin kritik önemdeki paragrafında, uzak nesneler arasındaki kuantum ilişkisinden "sistemin gelecekteki davranışıyla ilgili olası tahmin tiplerini belirleyen koşullar üzerindeki bir etki" (atalıklar metninin orijinalindedir) diye bahsetmiş. Kuantum bakış açısının "ölçüme dair bütün muğlak yorum olasılıklarının, kuantum kuramının nesneleri ve ölçüm aygıtları arasındaki sonlu ve kontrol edilemez etkileşime uygun bir biçimde akılcı olarak kullanılması olarak nitelenebileceği"ni söylemiştir.

5- Bu ışık hızı sınırı Einstein'ın görelilik kuramının başlıca sonuçlarından biridir. Bu yüzden de onun fizik kavrayışının temel bir sonucu olarak

rellik, nedenler ve sonuçlar arasında bir süre geçmesi gerektiğini söyler. Bir insan bahçedeki bir köpeği çağırdığında, çağrı sesinin ona ulaşması için gereken zaman geçinceye kadar köpek koşup gelmeyecektir.<sup>6</sup> O zamandan önce insanın yaptığı hiçbir şey köpeğin eylemlerini etkileyemez.

EPR argümanını bir paradoks haline getiren şey yerelliktir. Önerilen deneyde hiçbir şey iki ölçüm arasındaki zamanı sınırlamaz. A parçacığını Princeton'da tutup B parçacığını Kopenhag'a gönderebilir; A'nın konumunu, B'nin momentumunu, diyelim ki Doğu Standart Saati'ne göre öğleyin 12'yi bir nanosaniye geçte ölçmekte anlayabilirsiniz. Princeton'dan Kopenhag'a ikinci ölçümün sonucunu etkileyecek sürede bir haber uymasının imkânı yoktur. Bu yüzden, yerelliği varsaymak doğrudur, iki ölçüm birbirinden tamamen bağımsızdır, her biri temeldeki bir gerçekliği yansıtmalıdır.

Yerellik varsayımı ne kadar aşikâr görünurse görünsün, argümanın beyhude olduğu nokta tam da budur. Kuantum mekaniği yerel olmayan bir kuramdır, dolanık iki nesneden biri üzerinde yapılan bir ölçüm diğeri üzerindeki ölçümleri birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar anında etkileyecektir. Ölçülen nesnelerin dolanık olması koşuluyla Princeton'da A'nın ölçülmesi, Kopenhag'daki ölçümün sonucunu belirleyecektir.

Kuantum mekaniği yerel olmadığından, iki dolanık parçacığın durumu ikisinden biri ölçülünceye kadar belirsiz kalır. Parçacıkların durumunu bilmemek şöyle dursun, bu zaten bilinemezdir. Köpek örneğimizle bakalım: Biri iki köpekten birinin durumunu ölçünceye kadar iki köpek de aynı anda hem uyanık hem uykudadır; sistemin dalga fonksiyonunun "Truman uyanık, RD uyanık" a denk gelen bir kısmı ve "Truman uyuyor, RD uyuyor" a denk gelen bir kısmı vardır; ama köpeklerin hiçbirisi de kesin ola-

<sup>6</sup> Çağrılığında ne yaptığına bağlı olarak daha uzun bir süre bile geçebilir.

rak uyanık ya da uykuda değildir Köpekler Schrodinger'in kedi-  
sinin daha dostane bir versiyonu olarak bir superpozisyon duru-  
munda var olurlar.

Bir kopeğin durumu ancak ölçüldüğünde kesin bir değer alır.  
bu olduğunda da eş zamanlı olarak diğer kopeğin durumu belirle-  
nir Birini ölçtüğünüz anda, birbirlerinden ne kadar uzak olurlar  
sa olsunlar, ikisinin de durumunu belirlersiniz Truman uyanık  
sa RD de uyanıktır, Truman uyuyorsa RD de uyuyordur Durum-  
larını ölçmeden önce ikisini farklı odalara koyarsanız Truman'ın  
durumunu ölçmenin RD'yi doğrudan etkilememesine aralarında  
hiçbir bilgi akışı olmamasına rağmen birbirleriyle ilişkili olduk-  
larını görürsünüz Birbirinden ayrılmış iki köpek tek bir kuan-  
tum sistemidir ve bu sistemin herhangi bir parçasını ölçmek sis-  
temin tamamını etkiler.

Yerel olmamak (nonlocality) EPR deneyinin, belirsizlik ilke-  
sini aşmasını engeller A parçacığının ölçülmesi, sanki B parçacı-  
ğı ölçülmüş gibi B parçacığının durumunu bozar İki parçacık ol-  
çum öncesinde birbirinden ne kadar tıız ayrılmış olurlarsa ol-  
sunlar bu geçerlidir, dolanık parçacıklar yerel olmayan, tek bir  
kuantum sistemidirler.

Yerel olmamak, klasik bilimin temeline, üçüncü ve dördüncü  
bölümlerde tartıştığımız olasılık ve ölçüm meseleleri kadar sağ-  
lam ve rahatsız edici felsefi bir meydan okumada bulunur Dola-  
nık nesnelerin anında kesin durumlara geçmesi, kuantum kura-  
mının bizi varmaya zorladığı bir sonuçtur, klasik mekanikte boy-  
le bir şey yoktur.

EPR makalesiyle birlikte kuantum mekanığı bir çıkmaza gir-

7. Kopenhag yorumunu kabul ederseniz bu geçiş dalga fonksiyonunun  
tek bir hale çokmesini gerektirir Çok dınyalı yorumunu tercih ederseniz  
tek hale geçiş dalga fonksiyonunun tek bir dalını algılayabildiğimiz için  
ortaya çıkar Her iki durumda da ortaya çıkan korelasyon avıdır ve so-



di Bohr'un ortodoks kuantum kuramını destekleyenler EPR argümanına ikna olmamışlardı; ama zorlayıcı bir karşı argüman ile in suremiyorlardı. Bu arada Einstein gibi kuantum kuramının açılımlarından rahatsız olan insanlar EPR kuramını, bu tuhaf ve na-hoş kuantum meselesini anlamayı sağlayacak daha derin bir ku-ram iletı sürüyormuş gibi gösteriyordu. Bohr'un tarafını tutanla-rın sayısı Einstein'ın tarafını tutanlardan fazlaydı; çünkü kuan-tum kuramı atomik özelliklere dair çok doğru tahminlerde bulu-nuvordu, ama tarafların hiçbirini belirleyici bir deney bulamıyor-du.

### **Tartışma Son Buluyor: Bell'in Kuramı**

Bu açmaz, İrlandalı fizikçi John Bell kuantum kuramının tahmin-leriyle Einstein'ın iletı sürdüğü yerel gizli değişken modelinin tahminlerini birbirinden ayırmanın bir yolunu buluncaya dek yaklaşık 30 yıl sürdü. Bell, yerel gizli değişken kuramlarında ke-sin parçacık durumları ve sadece yerel etkileşimler olduğunu; bu yüzden de bu kuramların, kuantum kuramının sınırlı olmadığı biçimlerde sınırlı olduğunu fark etmişti. Dolanık kuantum par-çacıklarının durumlarının, mümkün hiçbir yerel gizli değişken kuramının karşılayamayacağı şekilde korelasyon içinde olacağı-nı söyleyerek bir matematiksel kuramı kanıtlamıştı. Bu korelas-yonlar deneysel olarak ölçülebiliyordu; yerel gizli değişken sınır-larının ötesine geçen korelasyonları gösteren bir deney Bohr'un haklı olduğunu, Einstein'ın yanıldığını kesinlikle kanıtlıyacaktı.

Bell'in kuramı modern kuantum mekaniği kavrayışına eleş-tirel yaklaşır, bu yüzden de biraz avrıntılı açıklamaya değer. Kö-peklerle gösterilemez, ama üçüncü bölümde bahsettiğimiz pola-rize atomlarla gösterilmesi çok zor değildir. Daha açık olalım: Po-larizasyonları aynı iki foton düşünelim, birinin yatay olduğu öl-

culürse, öburu de yatay, birinin açısı 45 dereceyse, öbürünün açısı da 45 derece Sonra olası uç farklı ölçüme bakalım.

Geleneksel düzenlemede iki deneyci vardır; biri "Alice", diğeri "Bob" dur, ama biz "Truman" ve "RD"ye sadık kalacağız, ıyı köpekler onlar, deneycilerin her birine bir foton düşer Truman a da RD'ye de bir polarize edici ve bir foton detektörü verilir, bu aygıtlar bir araya getirildiklerinde fotonun polarize ediciden geçip geçmemesine bağlı olarak "1" ya da "0" diye kayıt düşen detektörler oluştururlar Örneğin polarize edici dikey yerleştirildiyse dikey olarak polarize edilmiş bir foton bu aygıttan geçecek ve "1" verecektir, yatay olarak polarize edilmiş fotonu geçemeyecek ve "0" verecektir. Polarize edici 45 derece dikey yerleştirildiyse dikey olarak polarize edilmiş bir fotonun bu aygıttan geçip "1" verme olasılığı yüzde 50'dir, yoksa engellenecek ve "0" verecektir

Bu deney basıttır Köpeklerin her biri kendi polarize edicisini a, b veya c açılardan birine yerleştirir. Sonra bir foton için detektörün okuduğu değeri (1 ya da 0) yazar Sonra köpekler detektörlerinin konumunu değiştirir ve bunu yine yaparlar Bunu defalarca tekrarladıktan sonra, olası bütün detektör yerleştirme kombinasyonlarını birçok kere denemiş olacaklardır, sonra da vardıkları sonuçları karşılaştırırlar.

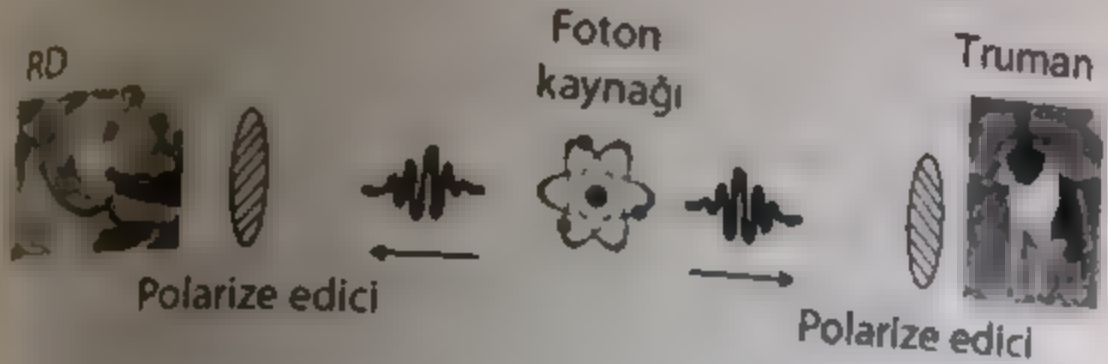
Sonuçları karşılaştırdınca iki şeyin farkına varırlar Polarize edicileri aynı açıyla kurulduğunda ikisinin de her seferinde aynı cevabı (1 ya da 0) aldığını görürler. Ayrıca hangi açıyı tercih ederlerse etsinler eşit sayıda "0" ya da "1" sonucu aldıklarını görürler Deneyi belli bir açıda 1000 kere tekrararlarsa 500 "0", 500 de "1" elde edeceklerdir Bir kuantum dolanıklığı durumu da uğraşıyor olsalar, yerel gizli değişken kuramının hukmündeki bir durumla da uğraşıyor olsalar bu iki gözlem geçerlidir

"Bir dakika, bir dakika Bu açılara bağlı değil mi?"

"Hangi açılara?"

"Şu a, b ve c açılara Neden eşit sayıda 0 ve 1 sonucu aldık?"

rıyorlar? Deney sonuçları hangi açıyı seçtiklerine bağlı değil mi? Polarize edicilerini dikey yerleştirirlerse örneğin, her zaman '1' sonucunu almazlar mı?"



Bell'in kuramını sınavan bir ölçümün şeması. Truman ve RD bir dolanık foton kaynağından birer foton alırlar, sonra polarize edici bir filtre ve detektör kullanarak üç ayrı açıda fotonlarının polarizasyonunu ölçerler. Polarize edicileri farklı açılarda olduğunda hangi sıklıkla aynı sonucu ölçtüklerine bakarak kuantum mekaniği ile yerel gizli değişken kuramı arasında bir ayrımı görebilirler.

"Hayır, burada uğraştığımız durumlar belirsiz polarizasyon durumları. Kuantum tablosunda polarizasyon belirsizdir; yerel gizli değişken tablosundaysa yatay ya da dikey olması aynı ölçüde olasıdır."

"İyi de bu 45 derece açıda oldukları anlamına gelmez mi? Bu durumda polarize edicilerini 45 derece açıyla yerleştirirlerse her seferinde '1' sonucunu almazlar mı?"

"Hayır, 45 derecede ikisi de aynı sonucu alır. Fotonların dikey saat yönünün tersine 45 derece açıda, saat yönünde 45 derece açıda ya da başka bir açıda bulunması eşit derecede olasıdır. Hangi açıyı seçtikleri, a mı b mi c mi gerçekten hiç fark etmez. Şu dikey ve yatay bile biraz keyfidir."

"Hayır değil."

"Evet öyle. Sana tuhaf bir şey söyledim de sen de şimdi yap-

tuğun gibi bana yan yan baktığında, 'dikey'in nasıl görüldüğü değişir, öyle değil mi?"

"Sanırım Bir açıdan her şey farklı görünür; bazen insanların tuhaf lafları daha anlamlı geliyor."

"Burada da aynı şey geçerli Tıpkı başını eğmenin 'dikey ve 'yatay' algını değiştirmesinde olduğu gibi, burada da polarize ediciler için belirlenen açılar '0' ve '1'in ne anlama geleceğini belirleyecek Sonuçlardan birini ya da diğerini alma olasılığı yine eşit olacak Ne gördüğün ne aradığına bağlıdır Biraz önce yaptığımız ödül benzetmesine donersek ödül olarak 'et' arıyorsan ya bilet ya tavuk alırsın, ama 'et olmayan' arıyorsan fıstık ezmesi ya da peynir."

"Ooo' Bu oduller kulağa harika geliyor Bana biraz bunlardan almalısın."

"Evcil hayvan mağazasında olduğunu sanmıyorum, ama bakanım."

Bell'in kuramını sınamak için deneyi yapanların farklı kurulumuş detektörlerle hangi sıklıkta aynı cevabı aldığını sorarız Başka bir deyişle, Truman, detektörü a'dayken kaç kere "0" almıştır, RD c'de kaç "0" almıştır, Truman b'de kaç tane "1" almıştır, RD a'da kaç tane "1" almıştır vs.? Her iki köpeğin de farklı detektör kurulumlarında aynı sonucu alması, yerel gizli değişken kuramlarında ve kuantum mekanığında birbirinden çok farklıdır

	Truman
a	a
1	1
2	1
3	1
4	1
5	0
6	0
7	0
8	0

in kuramı  
kurumların  
sa bakışımı  
tedünün a  
e rünü a k  
e de 1



## EPR Seçeneği: Yerel Gizli Değişken Tahmini

Bell'in kuramının kilit noktası, yerel gizli değişken kuramındaki bütün tahminlerin önceden yazılabilecek olmasıdır, hadı, bunu yapalım. İki fotondan her birinin durumu iyi tanımlıdır; biz bu durumu, polarize edicinin a, b, c konumlarında bulunduğu ölçümlerin kesin sonuçlarına verilen üç rakamla gösterebiliriz. İki fotonlu sistem, toplam sekiz olası durum verir. Bunları bir tabloda şöyle gösterebiliriz.

	Truman			RD		
Hal	a	b	c	a	b	c
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	1	0
3	1	0	1	1	0	1
4	1	0	0	1	0	0
5	0	1	1	0	1	1
6	0	1	0	0	1	0
7	0	0	1	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0

Bell'in kuramını sınamak için her iki kopeğin de farklı detektör kurulumlarında aynı cevabı alma olasılığına bakmamız gerek. Tabloya baktığımızda hangi açıyı seçersek seçelim sekiz olası halden dördünün aynı cevabı verdiğini görürüz. Örneğin Truman detektörünü a konumuna, RD de b'ye getirirse 1 ve 2. durumlarda ikisi de "1" sonucunu alacaktır, 7 ve 8. durumlarda da "0" sonucunu alacaklardır. Truman c'yi, RD a'yı seçerse aynı cevabı veren dört durum 1, 3, 6 ve 8 durumlar olacaktır.

Fakat farklı kurulumlarda aynı cevabı alma konusunda yüzde 50 olasılığa çakılıp kalmış değiliz. Fotonların belli bir durumda bulunması olasılığını değiştirmekte, örneğin 1 durumu daha olası ya da 6. durumu daha az olası kılmakta serbestiz. Fakat yaptığımız her değişiklik her detektör kurulumunda '0' ya da '1' sonucuna varmayı aynı derecede olası kılacak.

Tek tek durumların olasılıklarıyla oynarsak sınırlı bir yelpaze-deki olası durumları kapsadığımızı görürüz. Her iki kopeğin aynı sonuca varma olasılığını azami yüzde 100 yapabiliriz, ama asgari olasılık yüzde 0 değil, yüzde 33'tür. Ne yaparsak yapalım olasılığı yüzde 33'ten az yapamayız.<sup>8</sup>

Dikkatinizi çektiyse bu durumlara neyin yol açtığına ya da bu durumların nasıl seçildiğine dair hiçbir şey söylemedik. Söylememiz de gerekmiyor; sınırlı sayıda olası sonucu yazabilecek olmamız deneye sınırlamalar getiriyor. İki fotonun kaynaktan ayrıldıklarında iyi tanımlanmış durumlarda olduğu modellerin hiçbirinde, iki ölçümün aynı sonucu vermesi olasılığı yüzde 33'ten az olmaz. Olasılığın yüzde 100'den az ya da ona eşit, yüzde 33'ten fazla ya da ona eşit olması gerekir.<sup>9</sup> Aynı sınırlar hayal edebileceğiniz bütün yerel gizli değişken kuramları için geçerlidir.

8. Sistemin 1 halde olma olasılığı yüzde 50, 8 halde olma olasılığı yüzde 50 olursa azami yüzde 100 değerini alırsınız. Asgari yüzde 33 olasılığa, sistemin 1. ya da 8. halde olmasına hiç izin vermeyip diğer altı hali eşit ölçüde olası kıldığımızda ulaşırız. 2'den 7'ye kadar hollere bakarsanız hangi farklı açığı seçerseniz seçin her iki detektör için de aynı cevabı verecek her zaman iki hali olduğunu görürsünüz.

9. Bunun bir sonucu Bell'in kuramına dayalı öngörülere genellikle "Bell eşitsizlikleri" denmesidir.

## Bohr Seçeneği: Kuantum Mekanikine Dayalı Tahminler

O halde kuantum mekanikinin doğru olduğunu kanıtlamak için iki kopeğin de farklı detektör kurulumlarıyla aynı cevabı alma olasılığının yüzde 33'ten az olduğu bazı detektör açıları bulmamız gerekiyor. Bell, dolanıklık sayesinde bunun yapılabileceğini göstermiştir. İki fotondan birinin polarizasyonunu ölçmek, diğesinin polarizasyonunu anında belirler.

Kuantum tablosunda, iki fotonun halleri, ölçüm sonucunun "0" ya da "1" olması olasılığının yüzde 50 olduğu, ikisinden birinin ölçüldüğü ana kadar belirsizdir. O ölçüm anında, ikinci fotonun polarizasyonu, birincinin açısına, artık o açı her neyse ona avarlanmış olur. Birinci foton dikey bir polarize ediciden geçiyor, "1" sonucunu veriyorsa ikinci foton da artık dikey olarak polarize olmuştur. Birinci foton dikey polarize edicide engellenmiş, "0" sonucunu vermişse ikinci foton da artık yatay polarize olmuştur. O halde ikinci ölçümün olası sonuçları, birinci polarize edicinin açısıyla belirlenir.

Bell'in kuramını kanıtlamak için Truman'ın detektörünü dikey polarizasyona ayarladığını (buna a diyeceğiz), RD'nin de detektörünü ya saat yönünde 60 derece dikeye (b) ya da saat yönünün tersine 60 derece dikeye ayarladığını düşünelim. Polarize edici ayarları farklıysa iki kopeğin aynı cevapları alması hangi biçimlerde mümkün olabilir?

Sürenin yarısında, Truman detektörüyle "1" tespit edecektir, bu, RD'nin de "1" sonucunu alması anlamına gelir. Truman'ın polarize edicisi dikey olursa RD'nin detektörüne çarpan dolanık foton da dikey olarak polarize olmuş demektir. RD'nin detektörü

10. Açıklık adına önce Truman'ın fotonunun ölçüldüğü varsayımında bulunuyoruz. İlk ölçülenin RD'nin fotonu olduğunu varsayarsak da sonuç aynı olur.

h konumundaysa, bu durumda dikey foton ile polarize edici arasındaki açı 60 derecedir ve fotonun aygıttan geçme olasılığı yüzde 25'tir. Aynı şey a konumuna diğer yonde 60 derece açıda bulunan c konumu için de geçerlidir.

Surenin diğer varısında Truman "0" ölçecektir, dolanık fotonların ikisi de yatay polarizedir. RD'nin fotonunun açılarının ya birinde ya diğerinde engellenip "0" sonucu vermesi olasılığı yine yüzde 25'tir.<sup>11</sup>

O halde, Truman hangi değeri ölçerse ölçsun kuantum kuramı RD'nin farklı bir polarize edici konumuyla aynı değeri elde etmesi olasılığının sadece yüzde 25 olduğunu söylemektedir. Bu sonuç yerel gizli değişken kuramının tahminiyle doğrudan çelişir: bu kuram asgari olasılığın yüzde 33 olduğunu söylüyordu. Kuantum kuramının tahminlerine göre RD'nin dört ölçümünden sadece biri Truman'ın ölçümüyle aynıdır, yerel gizli değişken kuramıysa RD'nin üç ölçümünden en az birinin Truman'ın ölçümüyle aynı olması gerektiğini söyler.

İki kuramın aynı sonuçları vermesi gerektiğini, çünkü aynı sistemi, kuantum mekanığının farklı yorumlarının hepsinin de aynı tahminleri vereceği şekilde betimlediğini düşünebilirsiniz. Bell aksını gösterene kadar fizikçilerin çoğu böyle düşünüyordu. Yerel gizli değişkenler kuramlarının kilit varsayımları, bu kuramların katı sınırlamalara tabi olduğu anlamına gelir, yukarıdaki tablo gibi bütün olası sonuçları gösteren bir tablo hazırlayabilirsiniz. Kuantum kuramlarında aynı sınırlamalar yoktur, bu yüzden de akıllıca bir denev bu iki tip kuramı birbirinden ayırabilir.<sup>12</sup>

11. Yatay fotonun polarize ediciden, iki konumdan birinde ya da diğerinde bulunan detektöre geçmesi olasılığı yüzde 75'tir. Truman'ın sonucuysa yüzde 25 olasılıktır.

12. Bu durum yeterince akıllıca bir denevin **diyeлим** Kopenhag yorumu ile çoğul denevler yorumunu birbirinden ayırıp ayıramayacağını yönünde so-



Sonuçlar farklıdır çünkü kuantum mekaniği yerel değildir, nonlocal. RD'nin fotonlarının polarizasyonu önceden belirlenmez, Truman'ın yaptığı ölçümün sonucuyla belirlenir. Farklı aygıt kurulumlarıyla aynı sonucu alma olasılığı düşüktür; çünkü iki ölçüm birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar, ne zaman yapılmış olurlarsa olsunlar birbirlerini etkilerler. Einstein buna "tekinsiz" demişti, onunla bunu tartışmak zordu.

"Daha iyi bir kuram oluşturamıyor musunuz?"

"Nasıl daha iyi bir kuram?"

"Daha iyi bir gizli değişken kuramı. Tahminlere daha iyi uyan bir kuram."

"Butun mesele de bu zaten. Bell belli bir kurama bakmamıştı, onun gösterdiği şey, kuantum mekaniğinin bütün tahminlerini yeniden üretecek olası bir gizli değişken kuramı olmadığıydı. İki ölçüm birbirinden bağımsızsa, işleri, ölçümlerin kuantum mekaniğinde gördüğün korelasyonun aynısını göstermesini sağlayacak şekilde düzenlemenin bir yolu yoktur."

"Ölçümlerin birbirine bağlı olmasını sağlayın o zaman."

"Bu işe yarıyor; ama o zaman da yerel gizli değişken kuramı olmaktan çıkıyor. Aslına bakarsan David Bohm, yerel olmayan gizli değişkenlerin kullanıldığı; konumu, yönlü hızı belli parçacıklardan yararlanarak kuantum kuramının bütün tahminlerinin yeniden üretildiği bir kuantum mekaniği versiyonu üzerinde çalıştı."

"Bak bu kulağa hoş geliyor. Neden insanlar bundan yararlanmıyor?"

"Bohm'un kuramı ışın içine fazladan bir 'kuantum potansiyeli' sokuyor; bütün evrene yayılan ve deneyin herhangi bir özelli-

---

rular doğurabilir. Bu, kuantum kuramı ile yerel gizli değişken kuramlarını birbirinden ayırmaktan çok daha zor bir problemdir. Gelecekte bir John Bell çıkıp doğru sinama yöntemini bulabilir; ama şimdiye kadar bunu başarmış kimse yoktur.

gını değiştirdiğinde anında değişen bir fonksiyon bu. Gerçekten de tuhaf bir nane. hesaplama yaparken insanın başını ağrıttıyor. Kuantum alan kuramı diye bilinen kuram çerçevesinde, olağan kuantum mekanığını görelilikle uyumlu olacak şekilde genişletmek daha kolay."

"Ama yanlış değil, ha?"

"Hayır, olağan kuantum kuramıyla aynı tahminlerde bulunuyor. Bunu, daha önce bahsettiğimiz Kopenhag yorumu ya da çoğul dünyalar yorumu gibi bir kuantum kuramı yorumunun aşırı bir versiyonu olarak görebilirsin. Kurama biraz daha matematik ekliyor, ama pratik anlamda farklı bir şey tahmin etmiyor."

"Hmm."

"Bu tartışma açısından önemli olan şey, Bohm'in kuramının yerel olmaması, EPR paradoksu ve Bell'in kuramı yerel olmamakla ilgili. Bunlardan, kuantum kuramının, iki farklı yerdeki ölçümlerin birbirini hiç etkilemeyeceği katı bir yerel kuram olmayacağını biliyoruz."

"Bu içime bir kurt düşürdü. Hangisinin gerçekten doğru olduğunu nereden biliyoruz?"

"Bunu sorduguna sevindim."

Bu örnek özellikle Bell'in kuramını gösterir, ama genel kuramın havasını da yakalar. Bell'in gösterdiği şey, genel olarak yerel gizli değişken kuramlarıyla ulaşılabilecek şeyin sınırları olduğu, belli koşullar altında kuantum mekanığının bu sınırları aşacağıydı. Akıllıca bir deney, kuantum deneyinin mi haklı olduğunu yoksa Einstein'ın umduğu gibi onun yerini bir yerel gizli değişken kuramının mı alacağını kesin olarak belirleyebilir.

kuantum kuramını 1960  
Aspect ve m  
bu deneyle  
devre dışı bırak  
sonu  
açıkla  
bu uç dene  
örne  
ikna etmek  
Sırf ba  
dış ıttırız  
de yakınla  
düşünce dene  
birkaç na  
sagladı Bu  
va yatay  
da diğerine  
bir yatay  
da Bell'in kura  
deneyde dola  
detektor ye  
bulunuyor  
fotonun  
yıkarcı  
de "1" son

## Laboratuvar Deneyleri ve İlmekler: Aspect Deneyleri

Bell'unlu kuramını 1964'te yayınladı 1981 ve 1982'de Fransız fizikçi Alain Aspect ve meslektaşları Bell'in tahminlerini üç deneyle sınıadılar, bu deneylerin yerel gizli değişken kuramlarını kesin olarak devre dışı bıraktığı genel kabul görmektedir.<sup>13</sup> Bir dizi "ilmegi", vardıkları sonuçlarda bazı yerel gizli değişken modellerinin geçebileceği açıkları kapatmak için bu üç deneye gerek vardı.

Burada bu üç deneyi anlatacağız, çünkü deneysel fizik sanatının dikkat çekici örnekleridir. Fakat bunun da ötesinde fizikçilerin bir şeye ikna etmek istiyorsanız nereye kadar gümeniz gerektiğini gösterirler. Sırf bariz itirazları değil, biraz saçma görünebilecek olasılık dışı itirazları da cevaplamamız gerekir.

1981 de yayınlanan ilk deney, esasen Truman ve RD ile yaptığımız düşünce deneyinin aynısıydı. Aspect'nin grubu kalsiyum atomlarının birkaç nanosaniye farkla, ters yonlere giden iki atom salmasını sağladı. Bu fotonların aynı polarizasyona sahip olması garantiydi, ya yatay ya dikey olmaları (ya da başka iki açının birinde ya da diğerinde olmaları) aynı derecede olasıydı; ama fotonlardan biri yataysa diğerinin de yatay olması gerekiyordu. Bu tam da Bell'in kuramını sınamak için gereksindiğiniz dolanıklık halidir.

İlk deneyde dolanık foton kaynağının birbirine karşıt iki yanına iki detektör yerleştirdiler, her detektörün önünde bir polarize edici bulunuyordu. Polarize ediciler farklı açılara ayarlanmışlardı ve bir fotonun her iki detektörde birden kaç kere tespit edildiğini; yani yukarıdaki örneğimiz bağlamında her iki detektörün aynı seferde "1" sonucunu kaç kere verdiğini ölçüyorlardı.

13- John Clauser ve başka birkaç kişi daha önce bazı testler yapmıştı; fakat Aspect (As-pee diye okunur) deneyleri daha kesin sonuçlar veriyordu, bu yüzden de belirleyici testler olarak görüldüler.

## Foton kaynağı



İlk Aspect deneyi Hareketlendirilmiş bir kalsiyum atomu polarizasyonları dolanık iki foton salar Fotonların her biri önünde uygun bir açıyla yerleştirilmiş, polarize edici bir filtrenin bulunduğu bir detektöre doğru gider

Fizikçiler sayılarla uğraşmayı severler; kullandıkları bu özel konfigürasyon için geliştirilmiş yerel bir gizli değişken modeli, vardıkları sonuçların -1 ile 0 arasında bir sayıya çıkacağı tahmininde bulunuyordu. Deneyi yaptıklarında 0,126 gibi bir değer ölçtüler, artı-eksi 0,014 gibi bir belirsizlik payı vardı.<sup>14</sup> Maksimum yerel gizli değişken değeriyle ölçümleri arasındaki fark, ölçümün belirsizlik payından dokuz kat daha büyüktü; bu da bunun şans eseri gerçekleşmesi olasılığının  $10^{36}$  da bir olduğu anlamına geliyordu.<sup>15</sup>

O halde bu, yerel gizli değişken kuramlarının sonu anlamına geliyordu, öyle değil mi? Tıpkı yukarıda yaptığımız hayali deneydeki gibi bunun şans eseri gerçekleşmesi olasılığı inanılmaz derecede düşüktür. Peki, o zaman bırakın üçuncüyü neden ikinci bir deney yapmaya gerek duydular?

Maalesef vardıkları sonuçta, bazı yerel gizli değişken kuram-

14- Bu belirsizlik, deneyin ayrıntılarına dayanan teknik bir sınırlamadan kaynaklanır. Heisenberg'in belirsizlik ilkesiyle hiçbir ilgisi yoktur.

15-  $10^{36}$  bir milyar milyar milyar milyardır. O kadar büyük bir rakamdır ki Carl "milyarlarca milyarlarca" Sagan bunu söylerken arada gözlerini kırpar bilirdi.



larının ayakta kalmasını mümkün kılacak bir açık vardır. Düşünce deneyimizde Truman ve RD'nin kesinlikle mükemmel detektörleri olduğunu, çünkü onların çok iyi kopekler olduğunu düşünmüştük. Fakat Aspect ve çalışma arkadaşları sadece insandı, bu yüzden de verimliliği sınırlı detektörlerle çalışıyorlardı. Eğer de olsa, bir detektör gerçekten orada olan bir fotonu kaydetmebilir.

Bu bir sorundur; çünkü bir foton görmeyi bekleyip de görmediklerinde deneyleri "0" kaydediyordu; bu fotonların polarize ediciler tarafından engellendiğini varsayıyorlardı. Fakat bazen deneyleri foton tespit edemediğinden, ilk Aspect deneyinin yerel gizli değişken deneyini çığnıyormuş gibi görüldüğü de düşünülebilir. Bu "0"ların bazılarının gerçekten "1" olmasının gerekmesi, sonuçlarda bir karışıklığa yol açabilirdi.

Yerel gizli değişken kuramlarının bu açığı kapatması için evrenin biraz ters olması gerekirdi, ama bu mümkündür, bu yüzden de her foton için iki detektör kullanarak iki deney yaptılar ve bu deney 1982'de yayınlandı.

Detektör verimliliği açığını, olası her iki polarizasyonu doğru dan tespit ederek ve yalnızca aygıtın her iki tarafında da bir foton tespit ettikleri deneyleri geçerli sayarak kapattılar. Polarize edicilerin yerine, her polarizasyonu kendi detektörüne yönlendiren polarize edici huzme ayırıcı koydular. Bu detektörlerden biri bir fotonu kaydedemezse deneyin o tekrarı sayılmıyordu.

Ekibin ikinci ölçümde ölçtüğü değer, yerel gizli değişken sınırını belirsizlik payının 40 kat üstüne çıkararak aştı; bunun şans eseri gerçekleşmesi olasılığı saçma denemek kadar düşüktü. Peki, üçüncü deney neden yapıldı? İkinci deney ne kadar etkileyici olursa olsun bir açık bırakmıştı, bir şey detektörler ile foton kaynağı arasında mesaj iletmış olabilirdi.



*İkinci Aspect deneyi: Dolayık fotonlar kaynaktan ayrılır ve onlarında polarize edici bir huzme ayırıcının bulunduğu iki detektöre doğru yol alır. Bu huzme ayırıcılar "0" polarizasyonu bir detektöre, "1" polarizasyonu diğer detektöre yönlendirerek deneyde hiçbir fotonun kaybolmamasını sağlar.*

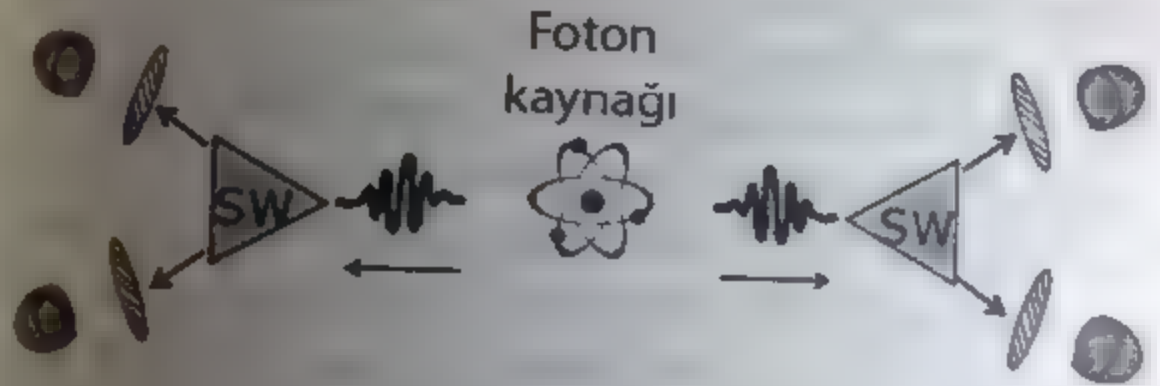
Bell'in kuramının sınanabilmesi için, bir detektörde yapılan ölçümün diğer detektörde olup bitenlere dayanması, aralarında ışıktan daha hızlı bir etkileşim yoksa imkânsız olmalıdır. Detektorler arasında ışık hızından daha düşük hızlarda mesaj iletmenin bir yolu varsa bütün bahisler yatar. İlk iki deneyde, deney ekibi detektorlerin konumunu önceden belirlemiş ve onları ışıgın foton kaynağı ile detektör arasındaki yolu aşması için gereken sureden daha uzun bir süre boyunca bu konumda bırakmışlardı. Bir şey polarize edicilerin konumunu detektorlerden kaynağa iletmiş, kaynak da kuantum tahminlerine uyacak şekilde seçilmiş kesin polarizasyon değerlerine sahip fotonlar göndermiş olabilirdi. Deneyi yapanlar açıları değiştirdiklerinde, kaynağa yeni değerler gönderilecek, bu da kaynağın gönderdiği fotonların polarizasyonlarını değiştirecekti. Varılan sonuçlar kuantum kuramını kanıtlıyormuş gibi görünüyordu, ama kozmik bir komploya kurban gitmiş olabiliyorlardı.

Üçüncü deneyde, bu açığı da kapamanın dahiyane bir yolu bulundu. Aspect ve meslektaşları, ışığın kaynaktan detektöre ulaşabileceğinden hızlı bir şekilde detektor konumlarını de-  
 3.12.1982

irerek kuantum sonuçlarını taklit eden bir tür kozmik komplo olasılığını devre dışı bıraktılar.

Huzme ayırıcıların yerine, fotonları, her biri farklı bir polarizasyona ayarlanmış iki detektörden birine yöneltebilecek hızlı optik anahtarlar koydular. Anahtarlar her 10 nanosaniyede bir detektör değiştiriyordu, fotonların detektöre ulaşması ise 40 nanosaniye alıyordu. Aslına bakarsanız bir fotonun hangi detektöre ulaşacağı, foton kaynaktan ayrıldıktan sonra belli oluyordu.

Üçüncü deneyin sonuçları yerel gizli değişken sınırını, belirsizlik payının beş katına çıkarak aştı. Boyle bir sonucun kazara gerçekleşmesi olasılığı yüz milyarda birdir, diğer iki deneydeki olasılıktan daha yüksektir, ama ikna edici olabilecek kadar düşüktür.



Üçüncü Aspect deneyi Dolanık iki foton kaynaktan ayrılır ve hızlı optik anahtarlara doğru yol alır; anahtarlar fotonların her birini iki farklı polarize ediciden birine gönderir; bu tercih ancak foton kaynaktan ayrıldıktan sonra gerçekleşir.

Üçüncü deney bile bütün açıkları kapatmıyordu,<sup>16</sup> ama Aspect burada durdu; çünkü deneyler olağanüstü derecede zordu. Birkaç kişi daha modern dolanık foton kaynakları kullanarak bu

16- Aslında üçüncü deney detektör verimliliği açığını yeniden açar; çünkü polarize edicilerin her biri için bir detektör kullanılmıştır.

denevleri tekrarladı. 2008'de yapılan bir deneyde foton yerine dolanık iyonlar kullanılarak Bell'in kuramı sinandı, fakat açığın olmadığı bir test henüz gerçekleştirilmiş değildir. Sonuçta, yerel gizli değişken kuramlarının tam anlamıyla devre dışı bırakılmadığını savunan hâlâ birkaç kişi vardır.

Bu olumune katı birkaç kuramcı bir yana, fizikçilerin büyük çoğunluğu, Aspect ve ekibinin Bell kuramlarını sinamak için yaptığı denevlerin, kuantum mekanığının yerel olmadığını kesin bir biçimde gösterdiğinde hemfikirdir. Evrenimiz parçacıkların her zaman kesin özelliklere sahip olduğu, bir yerde yapılan ölçümlerin başka yerlerde yapılan ölçümlerle etkilenmediği bir kuramla betimlenemez.

Aspect nin denevleri, dünyanın, Einstein'ın savunduğu, 1935 tarihli Einstein, Podolsky ve Rosen imzalı makalede sunulduğu biçimde görülmesinin gurültülü bir yenilgiye uğraması anlamına geliyordu. EPR makalesi yanlış olsa da parlak bir yanlıştı; fizikçileri yerel olmamanın felsefi açılarıyla uğraşmaya zorlamıştı. Makalede sunulan fikirlerin incelenmesi, kuantum evrenimizin tuhaf niteliğine dair anlayışımızı derinleştirmişti. EPR makalesinde kullanılan kuantum dolanıklığı fikrinin de kuantum gerçekliğinin yerel olmayan niteliğini kullanarak inanılmaz şeyler yapmamızı mümkün kılacağı anlaşıldı.

"Fizikçiler gerçekten de tuhaf "

"Evet, yerel olmama tuhaftır "

"Yok o değil, şu açıklar. Fizikçiler aygıtın farklı kısımları arasında mesaj iletimi olduğuna gerçekten de inanıyor mu? Ne taşıyacak ki o mesajları?"

17. Paul Kwiat (beşinci bölümde bahsettiğimiz kuantum sorgulama denevlerini gerçekleştiren Innsbruck-Los Alamos ekibinde yer alıyordu) ve meslektaşlarının Los Alamos'ta yaptıkları bir deneyde belirsizlik payından 100 kat daha büyük çıkarak insanın kafasını karıştıran bir etki görülmüştü.



"Akla yatkın bir mekanizma öneren biri çıktı mı bilmiyorum; ama bu aslında önemli değil. Görünmez kuantum tavşancıkları taşıyabilirdi, ne kadar farklı olurlarsa olsunlar "

"Kuantum tavşancıkları mı?"

"Görünmez kuantum tavşancıkları ışık hızında hareket ediyorlar Fazla umutlanma "

"Ooo!"

"Her neyse üçüncü Aspect deneyi, aygıtın kısımları arasında tavşanlar olsun, başka şeyler olsun mesaj taşıyacak araçları büyük ölçüde devre dışı bırakır. Mesele şu ki bundan önce başka bir açıklamanın olması prensipte mümkündü. Bilimde, birini olgandıışı bir iddiaya ikna etmek istiyorsan olası bütün açıklamaların hatta gerçekten olasılık dışı görünen açıklamaları bile devre dışı bırakman gerekir "

"Tavşanlı açıklamaları da mı?"

"Tavşanlı açıklamaları da. Hem zaten birbirine uzak parçacıklar arasında yerel olmayan bir biçimde korelasyon kurulması fikri, kuantum tavşancıkları fikri kadar tuhaf bir açıklama değil "

"İyi noktaya parmak bastın. Peki, bu neye yarar?"

"Ne demek istiyorsun?"

"Son paragrafta, dolanıklığın bir şeylere yaradığı yolunda gerçekten de vurgulu cümleler sarf ettin Neye yarıyor? Işıktan hızlı mesaj göndermeye mi?"

"Hayır, bunu ışıktan hızlı iletişim için kullanamazsın, çünkü tespitler rastgeledir. Parçacıklar arasında korelasyon vardır; ama her parçacık çiftinin korelasyonu rastgele olacaktır. Birine EPR korelasyonlarını kullanarak mesaj gönderemem, gönderebileceğim tek şey rastgele rakam dizileri olur "

"İyi de bu neye yarar?"

"Rastgele rakam dizileri kuantum kriptografisine, çözülemez şifreler oluşturmaya yarayabilir. Dolanıklık fikri, kuantum bilgisayarlarının temelindedir, kuantum bilgisayarları normal bir bil-

gisayarın çözemeyeceği problemleri halleder. Bir de dolanıklığı, durumları bir yerden diğerine aktarmak için kullanan kuantum teleportasyonu vardır. Envari çeşit iş var yanı, ararsan bulursun.

"Ooo' Teleportasyon kulaga hoş geliyor! Ondan bahset!"

"Evet, bir sonraki konumuz o."

Ban  
Ku

zoma giriyor  
ve işaret  
nam var!"  
kten mi? N  
ni bozucu  
ondan kaç  
kırıklığı  
emliğinden  
dan daha m  
arayacak  
çok daha  
nalde Kul  
ama" Ken  
salıyord  
ama mı?  
men öyle

## VIII

### Bana Bir Tavşan Işınla: Kuantum Işınlaması



Emmy buroma giriyor, görünüşe bakılırsa kendinden memnun  
Bu hiç de iyiye işaret değil

"Bir planım var!" diye bağırıyor

"Gerçekten mi? Nasıl bir planmış bu?"

"Şu sınır bozucu sincapları yakalamayı sağlayacak bir plan"  
Sincaplar ondan kaçıp arka bahçedeki ağaçlara tırmanıp duruyor  
o da hayal kırıklığı içinde

"Kuş yemliğinden dokulen yemleri yiyerek uçmayı öğrenece-  
ğin plandan daha mı iyi biri?"

"İşe yarayacaktı o plan," diyor gururla. "Evet, bilmeni isterim  
ki ondan çok daha iyi bir plan"

"İyi o halde Kulagım sende. Neymiş bakalım bu parlak plan?"

"Işınlama" Kendini beğenmiş görünüyor; zafer duygusuyla  
kuvrugunu sallıyor

"Işınlama mı?"

"Aynen öyle"

"Peki, ama bunu biraz açman lazım"

"Bak, şöyle düşündüm. Sorun, benim evden geldiğimi görme-  
len ve ağaçlara benden önce çıkmaları. Sincaplarla ağaçlar arası-

na girebilirsem, onları oraya varmadan yakalayabilirim."

"Peki, hâlâ dinliyorum."

"Bu yüzden de kapıdan geçmek yerine arka bahçeye ışınlanmam gerek " Şimdi bütün arka tarafı sallanıyor.

"Hi hi Peki, bunu nasıl başarmayı düşünüyorsun acaba?"

"Ben " Kuyruğu yavaşlıyor, o sevimli-zavallı görünümünün en iyisini takınıyor. "Ben bana yardım edersin diye ummuştum "

"Ben mi?"

"Evet Bazı fizikçilerin kuantum ışınlamasını gerçekleştirdiklerini okudum E, sen de fizikçisin, hem gerçekten de akıllısın, bir de kuantum biliyorsun O yüzden de bir ışınlayıcı yapmama yardım edersin diye umdum " Başımı kucagıma koyuyor "Lutfe-  
een! Ben iyi bir köpeğim."

Kulaklarının arkasını kaşıyorum "İyi bir kopeksin, ama gerçekten de yardım edemem. Öncelikle laboratuvarımda ışınlama deneyleri yapmıyorum Ama yapsaydım bile sincapları yakalamak için ışınlamayı kullanmana yardım edemezdim."

"Nedenmiş o?"

"Mevcut ışınlama deneylerinin hepsi de tek tek parçacıklarla, genellikle fotonlarla uğraşiyor. Sen muhtemelen  $10^{24}$ , yani yüz trilyon trilyon atomdan oluşuyorsun; şimdiye kadar teleporte edilmiş miktardan çok çok fazla."

"Evet, ama sen gerçekten de akıllısın. Biraz... Biraz daha büyüğü yapıvereceksin işte."

"Bana duyduğun guvene teşekkür ederim, ama hayır Asıl sorun şu ki insanların gerçek dünyada yaptığı ışınlama Uzay Yolu'nda gördüğün cihazlarla yapılan ışınlamaya benzemiyor "

"Neden peki?"

"Bak, kuantum ışınlamasının yaptığı tek şey bir parçacığın durumunu bir yerden diğerine aktarmak Diyelim ki burada bir atomum var; onu arka bahçeye "ışınlayabilirim"; orada burada başladığım atomla aynı durumda bir atom olabilir Ama bu sürecin



sonunda, başladığım yerde en baştaki atom hâlâ var olacaktır, o atom bir yerden diğerine gitmez "

"Bu çok ters. Ne anlamı var peki?"

"Bak, kuantum mekanığı, baştaki durumu değiştirmeksizin bir durumun eksiksiz bir kopyasını çıkarmanı sağlamaz, atom gibi şeylerin kuantum halleri çok kırılgandır. Bir kuantum durumunun bir yerden diğerine aktarılmasına ihtiyacın varsa, yapabileceğin en iyi şey onu ısınlamak olabilir." Biraz kuşkulu görünüyordu. "Birbirlerine bağlanması gereken birkaç kuantum bilgisayarın varsa, kuantum ısınlamasını internetin kuantum versiyonunu yapmakta kullanabilirsin."

"Peki, anlaşıldı. O zaman benim durumumu arka bahçeye ısınlada ben de onu sincap yakalamakta kullanayım."

"Senin durumunu bir avuç fotonla nasıl dolanıklaştıracacağımı bilsevdim bile, ki bilmiyorum, arka bahçede hammaddeye gereksinimimiz olurdu. Orada tıpkı sana benzeyen başka bir köpek olması gerekirdi."

Kuyruğu duruyor. "O köpekleri sevmeyiz," diyor. "Tıpkı bana benzeven kopekler. Benim bahçemde. O köpekleri hiç de sevmeyiz " Sıkılmış görünüyor.

"Hayır, sevmeyiz. Bize tüm gereken, senden bir tane." Biraz canlanıyor. "Görüyorsun işte, ısınlama iyi bir plan değil."

"Sanırım değil." Bir an sessiz duruyor ve düşünceli görünüyor. "Peki, o halde," diyor, "A planına geri döneriz."

"A planı mı?"

"Biraz kuş yemi alabilir miyim?"

"Kuantum ısınlaması" bir önceki bölümde tartıştığımız yerel olmayan korelasyonların en bilinen uygulamasıdır herhalde. Bu ismin hayal gücünü tetiklediği, Uzay Yolu'ndan, insanların ya kurgusal bilimle ya sırf büyüyle nesneleri bir yerde diğerine anında taşıyabildiği başka kurgulardan görüntüleri akla getirdiği ke-

sin A noktasındaki nesne yumuşak bir "pof"la ortadan kaybolur ve uzaktaki B noktasında yeniden belirir

Bilim-kurgunun yarattığı yüksek beklentiler, kuantum ışınlanması gerçekliğinin hayal kırıklığı gibi görünmesine yol açmaktadır. Gerçek kuantum ışınlanması sadece bir kuantum halinin bir yerden diğerine aktarılmasıyla ilgilidir; nesnelerin tamamen hareket ettirilmesiyle değil. Ayrıca bu transfer ışık hızından yavaştır; çünkü bilginin bir yerden diğerine gönderilmesi gerekir. Durumdan şüphelenmeyen yaratıkların bulunduğu yerlere kendilerini ışınlamayı uman kopekler için büyük hayal kırıklığıdır bu.

Yine de kuantum kuramının muhteşem derecede akıllıca bir kullanımıdır; daha önce bahsettiğimiz birkaç konuyu birbirine bağlar. Bu bölümde, kuantum ölçümü ve kararsızlığın, kuantum halleriyle ilgili bilginin bir yerden diğerine aktarılmasını nasıl zorlaştırdığını göreceğiz. "Kuantum ışınlanması" planının bu sorunlardan kaçınmak için yerel olmamayı (nonlocality) ve dolanık halleri nasıl dahiyane bir biçimde kullandığını, bu sorunlardan neden kaçınmak isteyebileceğinizi göreceğiz.

Kuantum ışınlanması karmaşık ve incelikli bir konudur, bu kitapta tartıştığımız konuların herhalde en zorudur. Ayrıca kuantum fizığının tuhaflığına ve gücüne verebileceğimiz en iyi örneklerdir.

### **Uzağa Kopyalama: Klasik "Işınlama"**

Bilim kurguda ve fantazide hayal edildiği gibi ışınlanamayız, ama ışınlanmanın özü, uzağa kopyalamadır, bir yerdeki bir nesneyi alırsınız ve onun yerine başka yerdeki tam bir kopyasını geçirirsiniz. Bu tanımla yaklaştığımızda elimizde klasik fizığın kullandığı yaklaşık bir ışınlanma vardır. Faks makinesi

Bir yerden diğerine anında göndermek istediğiniz bir belge varsa, örneğin Truman gerçekten güzel bir kemik aldıysa ve onun bir fotoğrafını göndererek RD'ye hava atmak istiyorsa bunu faks makinesiyle yapabilirsiniz. Makine belgeyi tarar, onu benzer bir belge yaratmaya yönelik elektronik talimatlara çevirir ve bu bilgiyi telefon hattı üzerinden uzaktaki başka bir faks makinesine gönderir, o makine de bir kopyasını hasar. Aktarılan, belgenin kendisi değil, o belgenin nasıl yapılacağı bilgisidir.

Faks makinesinin işleyişi kurgusal ışınlanma fikrinden farklıdır; ama bu farklılıklar o kadar da önemli değildir. Bir belgeyi bir yerden diğerine faksladığınızda farklı yerlerde iki kopya olur; ama bunu bir sorun olarak görüyorsanız gönderen faks makinesine orijinal belgeyi ortadan kaldıracak bir kagıt öğütücü ekleyebilirsiniz. Bir faks makinesinin ürettiği kopya mükemmel değildir, ama bu tarayıcının ve yazıcının çözünürlüğüyle ilgili bir meseledir, her zaman daha iyi bir tarayıcı ve yazıcı almaya düşünebilirsiniz. Aktarma işlemi, bilginin bir yerden diğerine aktarılması için geçen süreyle sınırlıdır, bu yüzden tam anında değildir. ama faks makinesinin kullanıldığı çoğu işlem için bu büyük bir sorun değildir.

Klasik bir dünyada kurgusal ışınlanma idealine yaklaşmak istiyorsanız yapabileceğiniz en iyi şey faks makinesi kavramının özelliklerini artırmak olur. Truman bir kemik alır, makineye verir, makine kemığı tarayıp onu oluşturan atomların ve moleküllerin düzenini belirler. Sonra bu bilgiyi RD'nin "ışınlanma makinesine" gönderir, o makine de eldeki malzemelerle benzer bir kemik yapar ve çignesin diye RD'ye sunar.

## Klonlamaya İzin Yok: Kuantum Sınırlamaları

Kuantum ışınlanmasına döneelim: Bir kuantum nesnesinin "ışınlanmasından" bahsediyoruz. Bu, nesneyi oluşturan atomlar ve moleküllerin doğru fiziksel düzenlenmesini elde etmekle kalmayıp superpozisyon durumları da dahil olmak üzere bütün bu parçacıkların kuantum durumlarını da doğru almak anlamına gelir. Truman RD'ye kutunun içinde bir kedi göndermek için nitelikleri artırılmış bir faks makinesi kullanabilir, fakat bir kutunun içinde yüzde 30 dırı, yüzde 30 ölü, yüzde 40 kafayı yemiş bir kedi gönderecek bir kuantum ışınlama aygıtına gereksinimi vardır. Bunun, kuantum ölçümünün etkin niteliği yüzünden, klasik benzetmeden çok çok daha zor olduğu anlaşılmaktadır.

Kuramda herhangi bir nesneyle kuantum ışınlanmasını gerçekleştirmek mümkünse de pratikte bugüne kadar yapılan deneylerin hepsinde fotonlar kullanılmıştır; bu yüzden de Truman'ın RD'ye belli bir polarizasyonda tek bir foton göndermeye çalıştığını düşünebiliriz.<sup>1</sup> Üçüncü bölümde gördüğümüz üzere polarize edilmiş bir foton yatay ve dikey polarizasyonların bir superpozisyonu olarak düşünülebilir, fotonun bu iki izimli durumdan birinde bulunma olasılığı vardır.

Polarizasyonu yatay ile dikey arasında bir fotonu tanımladığımızda, bu foton için bir süperpozisyon haline denk gelen bir dalga fonksiyonu yazarız: a kısmı dikey, b kısmı yataydır.

$$a|D\rangle + b|Y\rangle$$

a ve b rakamları bize, dikey ve yatay polarizasyonla karşılaşma olasılığını verir.<sup>2</sup> Aslına bakarsanız bir süperpozisyon duru-

1- Neden böyle tuhaf bir şey yapmak isteyebileceğini bu bölümün sonunda tartışacağız.

2- Daha kesin bir ifadeyle a' dikey polarizasyon bulma olasılığı, b' yatay



mundaki bir nesne, tam buna benzer bir dalga fonksiyonuyla tanımlanacaktır. Truman'dan RD'ye bir foton polarizasyonu göndermenin bir yolunu bulabilirsek aynı tekniği bir kutunun içindeki bir kedinin durumunu ışınlamak için de kullanabiliriz, bu sadece surece dahil olan parçacık sayısının artması meselesidir.

Yani, Truman'ın elinde RD'ye göndermek istediği bir foton var. Klasik reçete ona fotonun polarizasyonunu ölçmesini, ardından RD'ye telefon açıp benzer bir durumu nasıl hazırlayacağını anlatmasını söyler. Ama Truman'ın polarizasyonu ölçebilmesi ancak fotonun durumuna ilişkin önceden bir şey bilmesi ve polarizasyon detektörünü buna göre kurması halinde mümkündür. Örneğin fotonun dikey ya da yatay polarize edildiğini biliyorsa fotonu dikey duran bir polarize ediciye gönderebilir. Foton geçerse polarizasyonun dikey, geçmezse yatay olduğunu bilecektir. Ondan sonra bu bilgiyi RD'ye gönderebilir; RD de uygun halde bir foton hazırlayabilir.

Maalesef polarizasyon ara bir açıda -a kısmı dikey, b kısmı yatay- gerçekleşiyse Truman'ın gerekli ölçümü yapması mümkün değildir. a ve b sayıları bize fotonun dikey ya da yatay polarize ediciden geçme olasılığını verir; ama bir tek foton için hem a'yı hem b'yi ölçmenin bir yolu yoktur, foton polarize ediciden ya geçer ya geçmez. Foton polarize ediciden geçse bile superpozisyon bozulur ve foton ızınlı durumlardan birinde kalır.

Her iki olasılığı, aynı şekilde hazırlanmış fotonları kullanıp ölçümü birçok kere tekrarlayarak bulursunuz. Fakat bu, hedeflediğimiz üzere, bir tek fotonun polarizasyonunu aktarmamızı sağlamaz.

Bu polarizasyon ölçümü sorunu, kopyalanmama kuramına özgü bir örnektir. William Wootters ve Wojciech Zurek 1982'de,

polarizasyon bulma olasılığıdır,  $a^2 + b^2 = 1$ . Dolayısıyla dikeye 30 derece açılı, dikey bir polarize ediciden geçme şansı yüzde 75 olan bir foton için  $a = \sqrt{3/2}$  ve  $b = 1/2$ .

bilinmeyen bir kuantum durumunun mukemmel bir kopyasını çıkarmanın imkânsız olduğunu kanıtlamışlardır Durumun ne olduğuna dair önceden bir fikriniz yoksa, ölçmeye çalışırken fotonun durumunu değiştirirsiniz ve kopyanızın aslına uygun olup olmadığından emin olamazsınız. Truman RD'ye gerçekten de tek bir fotonun mukemmel bir kopyasını, fotonun polarizasyonunu önceden bilmeksizin göndermek istiyorsa bunu yapmanın daha akıllıca bir yolunu bulması gerekecektir

"Neden fotonu göndermiyor ki?"

"Efendim?"

"Diyorum ki bu bir foton. Işık hızında yol alıyor, fotonların yaptığı şey bu Benim bir fotonum olsaydı da başka bir kopeğe göndermek isteseydim... Yapmayacağım bir şey ya, diğer kopekler benim fotonlarıma layık değil Yine de yapsaydım fotonu obur kopeğe çevirir ve bırakırdım gitsin."

"Haa! Bak, bir yerden diğerine giderken yol üzerinde fotonun başına gelebilecek birçok şey vardır Öbür köpeğin, fotonu kesin-kes başlangıçtaki polarizasyonla aldığından emin olmak istiyorsan ışınlama bunu yapmanın emin bir yoludur."

"Ama yapılması istenecek aptalca bir iş."

"Hiç de öyle değil, ama nedenini anlamak için bu bölümün sonuna dek beklemen gerek."

### **Sihirli Bir Pusula: Kuantum Işınlanmasının Klasik Benzeri**

Kuantum ışınlanmasına klasik bir benzetme bulmak zordur, çünkü kapsadığı meseleler en baştan klasik değildir. Fakat neyi kapsadığını, foton ışınlanma sürecini grafik açıdan düşünerek biraz olsun koklayabiliriz Kuantum ışınlanmasının gerçekten neyi gerektirdiğine dair bir ipucu da edinebiliriz

Üçüncü bölümde gördüğümüz üzere, foton polarizasyonunu,

Dikey ye  
ışınlanma  
bu yöne baka  
değrtilabilirse  
şegim oklarını a  
kaynakları  
Truman kendi ok  
RD ve okunu  
Pusula ikis  
foton ışınlan  
erek vardır.

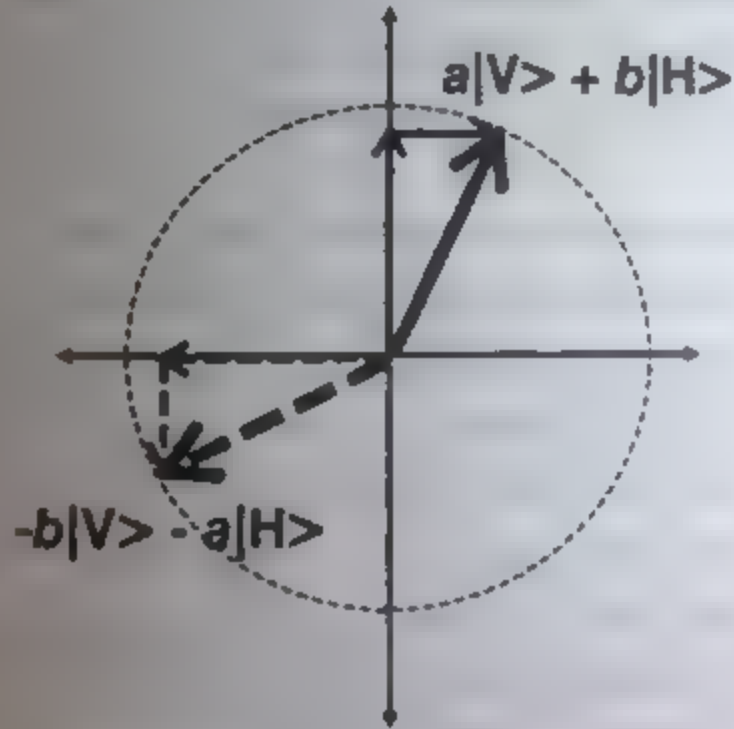
-b

polarizasyo  
20.22.22.22

polarizasyonun yönünü gösteren bir okla temsil edebiliriz. Yatay ve dikey bileşenleri, farklı yönlerde attığımız adım sayısı ile düşünebiliriz: Dikey yönde  $a$  kadar adım atıyorsun, yatay yönde  $b$  kadar

Bu grafikte, ışınlanma, okları aynı hızaya getirme sorunudur. Truman'ın bir yöne bakan bir oku vardır, RD de kendi okunu aynı yöne doğrultabilirse iki köpek bifttek alacaklardır. Bunu nasıl başarırlar?

İki köpeğin oklarını aynı yöne doğrultmalarının tek yolu, ortak bir bilgi kaynaklarının olmasıdır. İkisinin de birer pusulası olursa Truman kendi okunu pusula iğnesinin yönüyle karşılaştırabilir ve RD'ye okunu kuzeyin 17 derece doğusuna getirmesini söyleyebilir. Pusula ikisinin de paylaştığı bir başvuru kaynağı olacaktır, bir foton ışınlanması planında da benzer bir başvuru kaynağına gerek vardır.



İşık polarizasyonunun yatay ve dikey bileşenlerin toplamı olarak temsil edilmesi. Büyük oklar iki farklı foton halini belirtir, küçük oklarsa yatay ve dikey bileşenleri.

Ama bir foton ışınlama problemi, kopyalamama kuramı yüzünden, okları aynı hızaya getirmekten çok daha zor bir problemdir. Truman okunun yönünü, o yönü bozmadan ölçemez. Okunun yönünü ölçmeksizin bu yönün ne olduğunu RD'ye iletmesi gerekmektedir. Truman'ın yerel olmayan bir başvuru kaynağına ihtivacı vardır, bir ölçüm yapmadan RD'nin pusulasına bir yön bildirecek bir nevi sihirli bir pusulaya. Kuantum ışınlanması, yedinci bölümde tartıştığımız kuantum dolanıklığı bu tür yerel olmayan bir başvuru kaynağı sunduğu için mümkündür.

### **Bana Bir Foton Işınla: Kuantum Işınlanması**

Kuantum ışınlanması, IBM'de çalışan bir grup fizikçi (klonlama kuramının salıbu William Wootters da bu gruptaydı) tarafından 1993'te geliştirilmiştir. Bilinmeyen bir durumun bir yerden diğerine aktarılması için dört adımlı bir süreç kullanılır.

#### **Kuantum Işınlanmasının Dört Adımı**

1. Ortağınızla bir dolanık parçacık çiftini paylaşın.
2. Dolanık parçacıklardan biriyle durumunu ışınlamak istediğiniz parçacık arasında bir "dolanıklık ölçümü" yapın.
3. Ölçümünüzün sonuçlarını klasik yollarla ortağınıza gönderin.
4. Ortağınıza kendi parçacığının durumunu ölçüm sonucuna göre nasıl değiştireceğini söyleyin.

Bu ışınlama reçetesi, keyfi olarak seçilmiş bir durumun bir kopyasının, bir ölçüm ve bir telefon görüşmesiyle uzak bir yerde oluşturulması için kuantum dolanıklığından yararlanır. İki dolanık fotondan birini "ışınlanacak" halle uyumlu hale getirmek için kuantum ölçümünün etkin doğasını kullanır. Bu süreç



te ikinci dolanık foton, anında, ilk duruma bağlı olan bir polarizasyona çevrilir. Klonlamama kuramı hâlâ geçerlidir, bu yüzden de ilk parçacığın durumu ölçümle değişir; ama sürecin sonunda ikinci dolanık foton, "ışınlanma" öncesinde ilk fotonun durumundadır.

Bu süreç şöyle işler. Truman'ın belli bir polarizasyon durumunda tek bir foton olduğunu düşünelim; bu durumu eski dostu RD'ye eksiksiz aktarmak istiyor. (Ama bunu doğruca ona gönderemiyor) Boyle bir şey olabileceğini önceden düşünen Truman ve RD, dolanık haldeki bir foton çiftini paylaşmış, her biri bir foton almış. Bu fotonların polarizasyonları, ölçülunceye kadar kesin değil; ama birbirlerinin tersi olması garanti. Demek oluyor ki iki köpeğin elinde uç foton var. Birinci foton Truman'ın RD'ye aktarmak istediği  $(a|D\rangle + b|Y\rangle$  olarak betimlenmiş, rastgele seçilmiş bir açıdaki) durumdur, ikinci foton dolanık çiftten Truman'ın aldığı fotondur; üçüncü fotonsa dolanık çiftten RD'nin aldığı fotondur. Yukarıda özetlediğimiz ışınlanma süreci RD'nin bu üçüncü fotonu birinci fotonun kesin bir kopyasına çevirmesini sağlayacaktır.

ışınlanma kuantum fizikçi yerel olmadığı için işe yarar. Yedinci bölümde Truman'ın ikinci foton üzerinde yaptığı bir ölçümün RD'nin elindeki üçüncü fotonun polarizasyonunu anında belirleyeceğini görmüştük. Elbette ki mesele birinci foton ve ikinci fotonun tek tek polarizasyonlarının ölçülmesi kadar basit değildir Truman'ın yaptığı aslında, iki fotonu birlikte ölçmektir. İki polarizasyonun aynı mı yoksa farklı mı olduklarını ölçer; ne olduklarına değil, aynı olup olmadıklarına bakar.

Truman yatay mı yoksa dikey mi olduklarını sorup iki fotonu tek tek ölçmüş olsaydı dört olası sonuç olurdu. İki foton dikey olabilir (bunu  $D_1 D_2$  olarak yazarız; ilk harf birinci fotonun, ikincisi de ikinci fotonun polarizasyonunu gösterir); ikisi de ya-

ay olabilir ( $H_1 H_2$ ), birinci foton dikey, ikinci foton yatay olabilir ( $D_1 H_2$ ), birinci foton yatay, ikinci foton dikey olabilir ( $H_1 D_2$ ). Bu dört sonucun belirme olasılıkları farklıdır ve bu da ilk halin polarizasyonunun ne olduğuna bağlıdır.

### Işınlanma öncesi



### Işınlanma sonrası



Kuantum ışınlanmasının bir çizgi versiyonu. Sürecin başında Truman'ın iki fotonu vardır, birinci foton kesin (ama bilinmeyen) bir durumdadır ve Truman bu durumu RD'ye göndermeyi istemektedir, ikinci fotonu RD'deki üçüncü fotonla dolanık bir halde olan belirsiz bir haldedir. Işınlanma sürecinin tamamlanması sonrasında Truman'ın birbirleriyle dolanık, belirsiz halde iki fotonu olur, RD'nin de polarizasyonu birinci fotonun başlangıçtaki polarizasyonuna benzeyen bir fotonu vardır.

Işınlanma için Truman tek tek polarizasyonları ölçmez, aynı olup olmadıklarını sorar. Bu da yine dört olası sonuç verir, sonuçların ikisinde fotonların polarizasyonu aynı, ikisinde birbirinin tersidir. Bu "Bell halleri" bir dolanık foton çiftinin izimli durumlarıdır, Truman ölçüm yaptığı anda birinci ve ikinci fotonları bu dört durumdan birinde bulacaktır.

Durum numarası	Dalga Fonksiyonu	Polarizasyonlar
I	$ D_1 D_2\rangle +  Y_1 Y_2\rangle$	Aynı
II	$ D_1 D_2\rangle -  Y_1 Y_2\rangle$	Aynı
III	$ D_1 Y_2\rangle +  Y_1 D_2\rangle$	Ters
IV	$ D_1 Y_2\rangle -  Y_1 D_2\rangle$	Ters

Bu durumlar, bağımsız ölçümlerin dört olası sonucunun süperpozisyonlarıdır; tıpkı Schrodinger'in meşhur kedisinin "diri" ve "ölu" superpozisyonunda olması gibi. Polarizasyonların her biri hâlâ belirsizdir; birinci fotonun tekil polarizasyonunu ölçerseniz dikey ya da yatay sonucu almanız aynı derecede olasıdır. Birinci fotonu ölçtüğünüzde fotonun dört durumdan hangisinde olduğuna bağlı olarak ikinci fotonun durumunun da birinciyi le aynı ya da ona ters olmasını belirlersiniz.

"Dur bakalım, neden dört olası sonuç var? Sadece iki tane olması gerekmez mi? Artılara eksilere ne gerek var? Sonuçlar ya birbirinin aynıdır ya da değildir."

"Doğru, ama kuantum mekanığında, iki fotonun aynı polarizasyonda olduğu iki farklı durum var, birinci ve ikinci durum, polarizasyonlarının birbirine ters olduğu iki durum var üçüncü ve dördüncü durum. Böylece dört durum oluyor."

"Peki, ama birinci durumla ikincisi arasındaki fark ne?"

"Farklı durumlar;  $|D + |Y\rangle$  ile  $|D - |Y\rangle$  durumlarının tek bir foton için farklı durumlar olması gibi."

"Bir dakika... Farklı mı dedin?"

"Kesinlikle. Toplandıklarında, farklı bir açıdan tek bir polarizasyonu nasıl verdiklerine bakabilirsin. Şöyle düşünebilirsin:  $|D\rangle$  bir adım sağda ya da soldadır.  $|Y\rangle$  ise bir adım aşağı ya da yu-

3. O halde kesin bir dille ifade edecek olursak hali ölçülmeden önce Schrodinger'in kedisi iki halden birinde olabilir "diri artı ölu" ya da "diri eksi ölu".

karıdır. Bu durumda  $|D\rangle + |Y\rangle$  bir adım yukarı, bir adım sağdır.  $|D\rangle - |Y\rangle$  ise bir adım yukarı, bir adım soladır."

"Yani  $|D\rangle + |Y\rangle$  dikeyin 45 derece sağına,  $|D\rangle - |Y\rangle$  ise dikeyin 45 derece soluna."

"Kesinlikle. Her ikisinin de yatay ya da dikey olarak ölçülme şansı yarı yarıyadır, ama bunlar farklı durumlardır. Polarize ediciyi saat yönünde 45 derece çevirirsen,  $|D\rangle + |Y\rangle$  fotonlarının hepsi geçer,  $|D\rangle - |Y\rangle$  fotonlarının hepsi de engellenir."

"Yani, birinci durum yukarıya ve sağa, ikinci durum da yukarıya ve sola."

"Tabii, bundan daha karmaşık olacaktır. İki parçacık var, bu yüzden de bunu dört boyutlu ya da ona benzer bir şey yapman gerekiyor, ama evet temel fikir bu."

"Peki, sanırım bu aklıma yattı. Bir dakika. Baştaki iki dolanık fotonun polarizasyonlarının birbirine ters olması gerektiğini söylemiştin. Bu durumda üçüncü ve dördüncü durumda olmaları gerekmez mi?"

"Kesinlikle haklısın. Olağan ısınlanma sürecinde, ikinci ve üçüncü fotonların dördüncü durumda olması gerekir. Bunu daha önce belirtmedim, işleri gereksiz yere karıştıracaklarını düşündüm. İyi yakaladın."

"Çok akıllı bir kopeğimsin. Benden bir şey kaçmaz."

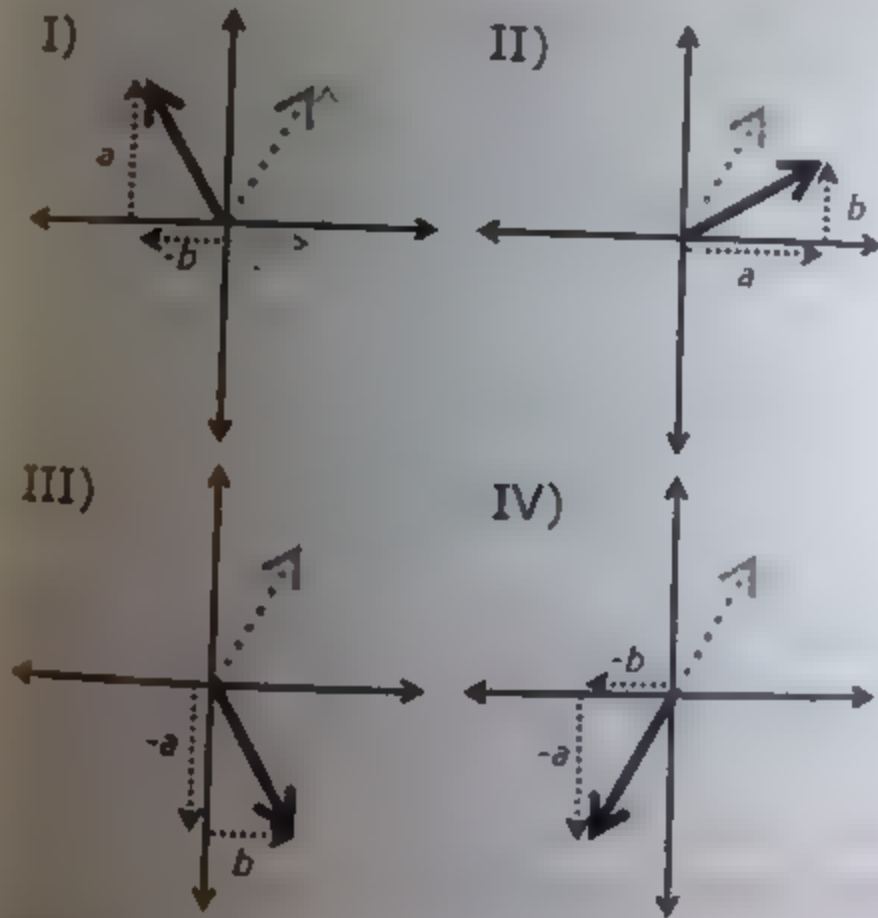
Truman, birinci ve ikinci fotonların polarizasyonlarının aynı olup olmadığını sorarak ölçümünü yapığında, birinci ve ikinci fotonlar bu dört durumdan birine yansır. O anda, ikinci ve üçüncü foton arasındaki dolanıklık, RD'deki üçüncü fotonun, Truman'ın ölçtüğü duruma bağlı olan belli bir polarizasyona girdiği anlamına gelir. RD'deki üçüncü fotonun polarizasyonu için dört olası sonuç vardır, bu polarizasyonun dikey ve yatay bileşenleri. Truman'daki birinci fotonun dikey ve yatay bileşenleriyle ilişkilidir.





Sonuçların her biri, ilk polarizasyon halinin basitçe döndürülmesidir, oklar farklı bir yönü gösterir; ama hâlâ bir yönde (yukarı, aşağı, sağa, sola) a kadar, diğer yönde b kadar adım atılması gerekir. Truman'ın ölçüm sonucu dikkate alındığında, RD, Truman'daki fotonun ilk durumuna nasıl ulaşılacağını bilmektedir bu durumun ne olduğunu bilmesine bile

O halde Truman'ın tek yapması gereken, RD'yi arayıp ona ölçümünün sonucunu söylemektir. O noktada RD, üçüncü fotonu doğru duruma sokmak için ne yapması gerektiğini tam olarak bilmektedir. Truman'ın ölçüm sonucuna dayanarak RD üçüncü fotonun polarizasyonunu döndürebilir ve başlangıçta Truman'ın elindeki durumu tam olarak yakaladığını bilir



Truman'ın dolanıklık ölçümünün dört olası sonucuna bağlı olarak "ışınlanma" sonrası RD'deki üçüncü fotonun hali. Her hal, birinci fotonun (noktalı çizgi) baştaki polarizasyonunun basitçe döndürülmesidir

Bu şema, birinci fotonun polarizasyon durumunu, üçüncü fotonu aktarır, onu birinci fotonun başlangıç durumunun mukemmel bir kopmasına çevirir. Fakat bu süreçte, birinci ve ikinci fotonlar üzerinde yapılan dolanıklık ölçümü birinci fotonun durumunu değiştirmiştir, birinci foton, artık başlangıçtakiyle aynı durumda değildir, ikinci fotonla belirsiz bir dolanıklık halindedir. Her iki köpeğin de tam olarak aynı duruma ulaşması imkânsızdır, kopulanmama kuramını desteklerler.

Işınlanmanın anında olmadığını da görürüz. Üçüncü fotonun polarizasyonu, Truman birinci ve ikinci fotonları ölçtüğünde anında belirlenir, ama atılması gereken bir adım daha vardır, çünkü üçüncü foton doğru duruma anında geçmez. Truman'ın yaptığı ölçümün sonucuna bağlı olarak dört olası durumdan birine girer. Teleportasyon, RD üçüncü fotonu sonuncu kez donduruncaya kadar tamamlanmaz. RD, ölçümün sonucunu belirlenmeden mesajı almadan bunu yapamaz, bu mesajın da ışık hızından az ya da ona eşit bir hızla bir köpekten diğerine gitmesi gerekir.

### **Tuna'nın Öte Yakasına Işınlanma: Deneyisel Gösterim**

Işınlanma fikri ilk kez 1993'te ortaya atıldı ve 1997'de Innsbruck'ta Anton Zeilinger başkanlığındaki bir grup tarafından gösterildi. Grup bir ultraviyole lazerinden, özel bir kristale bir foton göndermiş, kristalin her biri ilk fotonun enerjisinin yarısına sahip iki kızılaltı foton çıkarmasıyla iki dolanık foton elde etmişti. Toplam dört foton elde etmek için kristale iki kez lazer ışını göndermiş-

← Anton Zeilinger'i birinci bölümde moleküllerin kırılmasını gösteren grubun başkanı olarak, beşinci bölümde kuantum sorgulamasını yapan ken görmüştük. Zeilinger uzun ve sekin katı bir boyunda kuantum mekanizmasının tuhaf ve harika özelliklerini gösteren deneylere imza atmıştır.

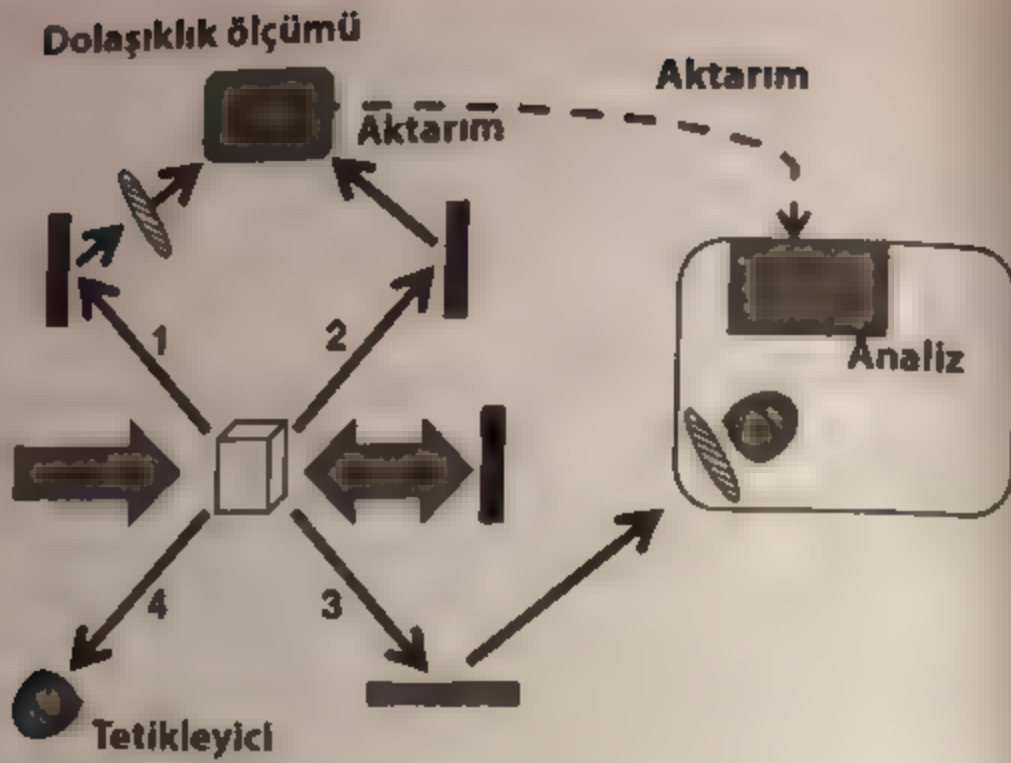
lerdi İlk çift ışınlama için gereken dolanık çift olarak kullanılmıştı (bizim örneğimizde ikinci ve üçüncü fotonlar), diğer ikisinden biri ışınlanacak durumu (birinci foton) ortaya çıkarmak için bir polarize ediciye gönderilmişti. Dördüncü fotonsa deneyi yapanların veri toplayacakları zamanı bilmeleri için bir tetikleyici olarak kullanılmıştı

Birinci ve ikinci fotonlar bir huzme ayırıcıda, dolanıklık ölçümünü gerçekleştirecek şekilde bir araya getirildi. Deneyi yapanlar dört Bell durumundan sadece birini tespit edebiliyorlardı, ama bu tespiti yapıklarında üçüncü fotonun belli bir polarizasyona yansıtıldığını biliyorlardı. Birinci ve ikinci fotonları dördüncü durumda tespit ettiklerinde (surenin yüzde 25'inde), analiz ediciye üçüncü fotonun polarizasyonunu ölçmesi için bir sinyal gönderiliyordu. Birinci fotonun polarizasyonunu kendileri ayarladıklarından bu deneyi birçok kez tekrarlayabildiler ve üçüncü fotonun tam olarak ışınlama protokolunun öngördüğü açıyla polarize edildiğini doğrulayabildiler.

İlk gösterimde, deneysel uygunluk gerekçeleriyle ölçüm adı mındaki dört olası Bell durumundan sadece biri kullanıldı ve polarizasyon durumu sadece yarım metre öteye ışınladı. İzlenen deneylerde ölçümler dört sonucu da içerecek şekilde genişletildi ve mesafe hatırı sayılır derecede uzatıldı. Zeilinger grubu 2004'te fotonları Tuna Nehri'nin<sup>5</sup> bir yakasından oburune (yaklaşık 600 metre) optik fiber üzerinden göndererek ışınlamanın uzun mesafelerde uygulanabilir olduğunu gösterdi.<sup>6</sup>

5- İki deney arasında geçen veda yıl içinde Profesör Zeilinger Innsbruck'tan Viyana'ya taşınmıştı.

6- Fotonları çok uzun mesafelere göndermek konusunda bir sorun yoktur, nihayetinde ışık çok uzak galaksilerden bize ulaşır. Fakat ortamla etkileşim dördüncü bölümde tartıştığımız uyum bozulması süreciyle dolanıklık hallerine zarar verebilir. Viyana deneyi dolanık fotonları var olan mesafelere gönderebilecek kadar uzun bir süre uyum bozulmasından kaçınılabileceğini göstermiştir.



Zeilinger grubunun ışınlanma deneyinin şeması. Bir ultraviyole lazer ışını, bir aşağı çevirme (downconversion) kristali nin içinden geçer ve burada iki kızılaltı foton çıkarır (foton 2 ve 3), bunlar ışınlanmada kullanılan dolanık çifttir. Ultraviyole lazer ışını daha sonra bir aynaya çarpar, kristalden yine geçer ve başka bir foton çifti üretir (foton 1 ve 4), bu fotonlardan biri ışınlanacak fotondur, diğeri ise deneycilerin dört fotonun da ortaya çıktığını bilmesini sağlayacak tetikleyicidir. Foton 1 ve 2 dolanıklık ölçümü için bir araya getirilir; uygun Bell durumunda oldukları görüldüğünde "ışınlama"yı doğrulamak için foton 3 ölçülür.

"İyi de bunun anlamı ne?"

"Ne demek istiyorsun?"

"Foton durumlarını ışınlayıp ışınlayamadığın kımın umurun-  
da?"

"Durumları ışınlanabilecek tek şey fotonlar değildir. İki du-

Bütün  
Işınlan

ışınlama,  
foton olarak  
aktarım



rumlu herhangi bir sistem için aynı matematik kesinlikle geçerlidir. böylece aynı şemayı tek bir elektron spin halini ışınlamak için ya da iki enerji düzeyinin belli bir superpozisyonunu bir atomdan diğerine aktarmak için kullanabilirsin "

"Evet, ama dolanık atomları ya da elektronları birbirleriyle değiştiriyorsan neden onları ışınlamak yerine gönderivermiyorsun?"

"Atomik durumlar ve elektron spinleri hassastır, durumun karışmasına neden olmaksızın onları uzun mesafelere göndermek imkânsızdır. Yapabileceğin şey, bir atom almak, onu dolanık çiftten bir fotonla dolanıklaştırmak ve ilk fotonun durumunu uzaktaki başka bir atoma ışınlamak için diğer atomu kullanmaktır "

"İyi, bu biraz daha ıy de yine bir tane atom var."

"Öyle olması gerekmiyor. Kopenhag'daki Niels Bohr Enstitüsü'nden bir grup 2006'da, ışınlamayı bir grup atomun kolektif halini, başka bir grup atoma aktarmak için kullandı. İki grubun her birinde yaklaşık bir trilyon atom vardı; köpekler ve insanlar ile kıyaslandığında düşük bir rakamdır; ama bu tekniği daha büyük sistemlere uygulayabileceğini gösterir."

"Kulağa hâlâ çok yararsız bir işmiş gibi geliyor, ama daha ıy-ye gidiyor sanırım."

"Teşekkür ederim. Çok nazıksın "

## Bütün Bunlar Neye Yarar? Işınlanmanın Uygulanma Alanları

Kuantum ışınlama, belli bir kuantum halini bir yerden diğerine aslına uygun olarak, baştaki nesneyi fiziksel olarak hareket ettirmeksizin aktarmak için dolanıklığı kullanmamızı mümkün kılar. Kuantum ışınlama, foton durumlarını uzak yerlerde yeniden üretmek için ya da bir atomun ya da atomlar grubunun bir super-

pozisyon durumunu, bir başka atoma ya da atomlar grubuna aktarmak için kullanılabilir. Tabii, bilim-kurgunun idealinden hala epeyce uzaktır.

Klasik faks makinesinde olduğu gibi, aktarılan tek şey enformasyondur. Kuantum ışınlama bir durumu ya da durumlar süperpozisyonunu bir yerden diğerine aktarmamızı mümkün kılar, tıpkı faks makinesinin bir belgenin üzerine basılı olan şeylerin faksını telefon hatları üzerinden göndermemizi mümkün kılması gibi. Fakat "ışınlanan" hal, bir atomun haliyse, ışınlama düzeneginin öbür ucunda bekleyen uygun atomlar olması gerekir; tıpkı alıcı faks makinesinin kâğıt ve mürekkeple dolu olmasının gerekmesi gibi.

Fakat hedefimiz bir nesneyi bir yerden diğerine aktarmaksa kuantum ışınlamasına ihtiyacınız olup olmadığı belli değildir. Kuantum ışınlama bir durumu bir yerden diğerine aktarır; ama bir yerden diğerine bir kopek ödülü gibi cansız bir nesne aktarıyorsanız kesin durumu korumanız gerekmeyebilir. Doğru molekülleri birbirleriyle ilişkili olarak doğru yerlerde bulundurduğunuz surece, ödülün faksındaki atomların tam olarak ilk durumdayla aynı olmaması, tadında ya da dokusunda büyük bir farklılık yaratmaz. Asıl ihtiyacınız olan moleküler düzeyde çalışan bir faks makinesidir ve bunda içkin olarak kuantum bir şey yoktur.

Peki, o zaman kuantum ışınlamayı neden önemseyelim? Kuantum ışınlama cansız nesneleri hareket ettirmek için gerekme-yebilir, ama bilinçli oluşumları taşımak için kritik önemde olabilir. Bazı bilim insanları, bilinçliliğin esasen bir kuantum fenomeni olduğuna inanır; örneğin Roger Penrose *The Emperor's New Mind* adlı eserinde bu fikri savunur. Haklılarsa insanları ya da kopekleri taşımak, beyinlerinin halını düzgünce yeniden üretmek

kın bir faks makinesine değil bir kuantum ışınlama cihazına ihtiyacımız olacaktır. Kuantum ışınlama, Scottie sizi Enterprise'a ışınladığında varacağınız yere, bıraktığınız yerden ayrılırkenki düşüncelerinizle varmanızı sağlamanın anahtarı olabilir.

Gerçi insanları ışınlamaya yaklaşmış bile sayılmayız; bu yüzden kuantum ışınlamaya bugün duyulan ilgi daha küçük nesnelere yöneliktir. Kuantum ışınlama, halle ilgili bilginin, bir yerden diğerine aktarılması gereken kritik kalem olduğu durumlarda yararlı ve önemlidir. Böyle bir şeyin bugünkü başlıca uygulama alanı kuantum bilgisayarlarıdır.

Bir kuantum bilgisayar, bugün kullandığımız klasik bilgisayarlar gibi, esasen "0" ve "1" denilen iki hal üstlenebilecek büyük bir nesneler topluluğudur. Bu "bit"leri birbirine bağlayıp rakamları temsil etmelerini sağlayabilirsiniz. Örneğin 229 sayısı sekiz bitli olarak "11100101" şeklinde temsil edilecektir.

Fakat bir kuantum bilgisayarında, "kubitler"<sup>8</sup> sadece "0" ve "1" durumlarında değil, "0" ve "1" in superpozisyonlarında da bulunur. Ayrıca dolanık durumlarda da bulunabilirler, bir kubitin durumu farklı bir yerdeki diğer kubitin durumuna bağlı olur. Bu fazladan unsurlar, bir kuantum bilgisayarının bazı problemleri, klasik bilgisayarlardan çok daha hızlı çözmesini sağlar, örneğin büyük sayıların çarpanlarını almak gibi. Mesajları -ister hükümet sırları ister internet üzerinden yapılan kredi kartı işlemleri olsun- şifrelemek için kullanılan modern kriptografi düzenekleri, çarpan almanın yavaş bir süreç olmasına dayanır. İşleyen bir kuantum bilgisayar bu şifreleri hızlıca çözebilir, bu da hükümetler ve bankaların kuantum bilgisayarlarına yoğun bir ilgi duyma-

7- Klasik bir bilgisayarda, silikon yongaların üzerinde milyonlarca minicik transistör kullanılır, kuantum bilgisayarları en azından iki durumu olan herhangi bir şeyi kullanabilir atomlar moleküller elektronlar

8- "ku" kuantumu ifade eder. Fizikçilerin zekice isimler bulma konusundaki becerileri pek takdir edilmez

sına yol açmaktadır.<sup>9</sup>

Tek bir kubitin kesin kuantum hali, kuantum bilgisayarının işleyişi açısından kritik önemdedir, kuantum ışınlanmanın yararlı uygulamalarına burada rastlanabilir. Çok sayıda kubitin dahil olduğu bir hesaplama, bilgisayarda ciddi bir mesafeyle birbirinden ayrılmış iki kubitin dolanıklığını gerektirebilir. Işınlama, gerekli işlemleri gerçekleştirmenin yararlı bir yolu olabilir.

Bu yolda biraz daha ilerleyip farklı yerlerdeki iki ya da daha fazla sayıda kuantum bilgisayarını birbirine bağlamak, Caltech'ten Jeff Kimble'in "Kuantum İnternet" dediği şeyi ortaya çıkarmak istersek dolanıklık ve ışınlamaya dayalı düzenlemeler temel önemde olabilir. Bu, bilgisayar işlemlerinin daha da iyileşmesini sağlayacaktır; tıpkı klasik internetin gündelik bilgisayarlarda yol açtığı biçimde.<sup>10</sup>

Nihai uygulama alanı ne olursa olsun kuantum ışınlama bu yüleyici bir konudur. EPR makalesinde incelenen, kuantum dolanıklığının yerel olmayan etkilerinin ve "uzaktaki tekinsiz eylem" in kullanılabileceğini, bilginin daha geleneksel biçimlerde yapılamayacak şekilde aktarılabileceğini gösterir. Köpeklerin sincap yakalamasını sağlamaz (henüz değil), ama evrenin derin ve tuhaf kuantum niteliğiyle ilgili başka bir derin kavrayış kaynağıdır.

"Bilmem ki ahbab, bana hâlâ biraz ters geliyor."

"O nedenmiş?"

"Eh, bir şeye 'ışınlama' diyorsan, durum bilgisini aktarmaktan daha fazlasına yaramasını bekliyorum da ondan."

9- Aslında Ulusal Güvenlik Ajansı, ABD'de kuantum bilgisayar araştırmasının finansmanında en büyük pay sahiplerinden biridir.

10- Elbette, Nijerya'daki köpeklerin basit bir işleme yardımcı olmak için banka hesap bilgilerini vermemiz karşılığında bir milyar sterlinlik maddi vaat eden kuantum e-postalarını da beraberinde getirecekler.



"Haklısın, bu bir talihsizlik. Ama bu ismi çıkaran ben değilim."

"Peki, dolanıklık bu kadar yani, öyle mi? Sırf Aspect deneyleri ve bir de ısınlama, ha?"

"Hayır, hiç de değil. Kuantum dolanıklığını kullanabileceğin birçok şey var. Soylediğim gibi, kuantum bilgisayarları için kilit önemde; ayrıca 'yogun şifreleme' denilen şeyde, aktarılan her bit için iki bit enformasyon göndermekte de kullanabilirsin."

"Ama bu yine de oradan oraya enformasyon aktarmak işte."

"Ha, bir de kuantum kriptografisi var, dolanıklığı rastgele bir rakam dizisini bir kışiden diğerine aktarmak için kullanıyorsun; onlar da bu rakamları mesajların şifresini güvenli bir biçimde çözebilmek için kullanıyor. Kimsenin bu mesajlaşmaya kulak kabartması mümkün değil; çünkü kulak kabartma parçacıkların durumlarını değiştirip şifreyi tespit edilebilecek şekilde değişirebilir."

"Yine hâlâ enformasyon."

"Evet, kesinlikle; ama kuantum fızığını düşünmenin uygun biçiminin enformasyon olduğunu düşünenler var. Bir anlamda, bütün fizik bilimi aslında enformasyonla ilgili."

"Yok ya? Eh, ben de bir köpegim, ben de tamamen sincaplarla ilgiliyım."

"Peki, ama bu da gerçekten enformasyonla ilgili."

"Nasıl oluyor o?"

"Bilgin olsun diye söyluyorum; çimenlerin tam ortasında oturan koca bir sincap var."

"Ooo! Şu tombul gürültülü sincaplar."

**Peynirden Yapılmış Tavşancıklar:  
Sanal Parçacıklar ve Kuantum Elektrodinamiği**



Emmy pencerede durmuş, kuyruğunu heyecanlı heyecanlı sallıyor. Dışarıya bakıyorum, bahçe boş. "Nereye bakıyorsun?" diye soruyorum.

"Peynirden yapılmış tavşancıklara!" diyor. Yine bakıyorum, bahçe hâlâ boş.

"Orada tavşan yok kı," diyorum; "Peynirden yapılmış tavşanlar da yok. Arka bahçe bomboş."

"Ama boş uzayda hep parçacıklar oluşuyor, değil mi?"

"Hâlâ benim kuantum fiziki kitaplarımı mı okuyorsun?"

"Sen evde olmadığında burası sıkıcı oluyor. Onu boş ver, soruma cevap ver."

"Evet, bir anlamda öyle. Bunlara sanal parçacıklar deniyor. Doğru koşullarda, boşluğun sıfır noktası enerjisi zaman zaman, bir normal madde, diğeri karşıt maddeden oluşan parçacık çiftleri olarak tezahür edebilir."

"Gördün mü?" diyor, daha da sert sallayarak kuyruğunu. "Peynirden yapılmış tavşancıklar!"

"Bu ne işine yarar bilemiyorum," diyorum. "Sanal parçacıkların enerji-zaman belirsizlik ilkesi gereği çok kısa bir süre için-

de birbirlerini ortadan kaldırması gerekir. Sanal bir elektron-pozitron çiftinin ömrü  $10^{-21}$  saniyedir, sonra ortadan kaybolur. Gerçek parçacıklar olabilecek kadar uzun bir süre etrafta bulunmazlar."

"Ama gerçek olabilirler, oyle değil mi?" Biraz endişelenmiş görünüyor. "Yani, Hawking ışınlamayı ne oluyor?"

"Evet, bir anlamda kesinlikle öyle. Fikir şudur: Bir kara deliğin yakınlarında oluşmuş bir sanal parçacık çiftinin bir üyesi kara deliğin içine çekilebilir; bu noktada diğer parçacık yırtar ve gerçek olur."

Yeniden kuyruk sallamaya başlıyor. "Peynirden yapılmış tavşancıklar!"

"Ne?"

Rahat bir nefes alıyor. "Bak, sanal parçacıklar her an oluşuyor, öyle değil mi? Bizim bahçemizde de?"

"Evet. Bu doğru."

"Tavşancıklar da dahil?"

"Teknik olarak bir tavşancık-karşıt tavşancık çifti olması gerekir."

"Ve bu tavşancıklar, peynirden yapılmış olabilirler."

"Pek muhtemel değil, ama Max Tegmark'inki<sup>1</sup> gibi 'mumkun olan her şeyin var olması gerekir' tarzı bir evrende sanırım bir peynirden (ve karşıt peynirden) bir tavşancık-karşıt tavşancık çiftinin arka bahçede oluşması olasıdır, ama."

"Eh, ben de onlardan birini yersem diğeri gerçek olur." Kuyruğunu o kadar şiddetli sallıyor ki bedeninin neredeyse bütün arka kısmı sallanıyor."

1- Max Tegmark MIT'de görevli bir kozmologdur, evrenimizin daha geniş bir "çoğul evrende"ki çok sayıdaki evrenden biri olduğunu ileri sürmeyle bilinir. Tegmark'a göre, bu çok evrende matematiksel olarak tanımlanabilecek her tür olası evren bulunmaktadır, bize hiçbir anlam ifade etmeyecek olanlar bile. Tegmark'ın çalışmaları biraz filozof David Kellogg Lewis'in "modal gerçekçilik" çalışmalarına benzer.

"Evet, ama birbirlerini ortadan kaldırmaları pek uzun sürmez."

"Çok hızlıyındır."

"Bir tavşancığın kütlesi dikkate alınırsa ömürleri ancak  $10^{22}$  saniye sürer."

"Bu durumda, beni dışarı çıkarsan iyi olur Peynirden yapılmış tavşancıkları yakalayabilirim böylece."

İçimi çekiyorum. "Dışarı çıkmak istiyorsun madem neden doğru dürüst söylemiyorsun?"

"Neresi eğlenceli olacak? Hadi bakalım, peynirden yapılmış tavşancıklar!"

Yine pencereden bakıyorum. "Ben hâlâ tavşancık göremiyorum, ama kuş yemliğinin orada bir sincap var."

"Ooo! Sincaplar!" Kapıyı açıyorum; sincabın peşinden fırlayıp koşuyor; sincap tam zamanında ağaca tırmanıyor

İkinci bölümde maddenin dalga niteliğinin sıfır noktası enerjisine yol açtığını görmüştük; bu hiçbir kuantum parçacığının tam anlamıyla duruyor olamayacağı, her zaman bir enerjisi olacağı anlamına geliyordu. İnanılmazdır, ama bu fikir boş uzav için dahi geçerlidir. Kuantum fiziginde, mukemmel bir boşluk bile sürekli bir faaliyet fırtınasıdır; sıfır noktası enerjisi sayesinde sanal parçacıklar kısacık bir an boyunca varlık bulur, sonra yine kaybolup gider.

Boş uzayın ortasında aniden varlık bulup ortadan kaybolan "sanal parçacıklar" fikri, modern fizikğin en tuhaf fikirlerinden biridir. Bu bölümde kuantum elektrodinamiğinden, sanal parçacıklar fikrinin gelişmesinin ardındaki kuramdan bahsedeceğiz. Kuantum elektrodinamiğini, bilim tarihinin en kesin test edilmiş kuramı haline getiren deneyleri de anlatacağız. İroniktir, bu ultra kesin kuram hakkındaki tartışmalarımızın Heisenberg'in belirsizlik ilkesiyle başlaması gerekiyor



## Saymak Zaman Alır: Enerji-Zaman Belirsizliği

Belirsizlik ilkesinin en iyi bilinen versiyonu, ikinci bölümde bahsettiğimiz, bir parçacığın konumu ve momentumundaki belirsizliklere bir sınırlama getiren versiyonudur. Çok temel bir düzeyde, bir parçacığın konumu hakkında ne kadar fazla şey bilirsek ne kadar hızlı hareket ettiğine dair o kadar az şey biliriz, aynı şey tersi için de geçerlidir.

Enerjideki belirsizliğin, zamandaki belirsizlikle çarpımının, Planck sabitinin 4 pi'ye bölünmesinden daha büyük olması gerektiğini söyleyen, enerji ile zaman arasındaki belirsizlik ilişkisi biraz daha az bilinir.

$$\Delta E \Delta t \geq h/4\pi$$

Konum-momentum belirsizliğinde olduğu gibi, bu da iki nicelikten biri hakkında daha fazla bilgi sahibi olduğumuzda diğersinin hakkında daha az şey bileceğimiz anlamına gelir.

Enerjinin bir şekilde zamanla ilgili olduğu fikri başta tuhaf görünebilir, ama ışığı düşünerek bunu daha iyi anlayabiliriz. Birinci bölümde gördüğümüz üzere bir fotonun enerjisi o ışığın rengiyle ilişkili frekansla belirlenir. O halde, kesinliğin düşük olduğu enerji ölçümleri, frekansın kesin ölçümünü gerektirir.

Peki, frekansı kesin olarak nasıl ölçersiniz? Düşünün ki heyecanlı bir kopeğin kuyruk sallama oranını ölçmek istiyorsunuz. Frekans ve büyüklükte küçük dalgalanmaların olduğu hızlı düzenli bir salınımdır bu. Köpeğiniz bazen biraz daha hızlı, bazen biraz daha yavaş, bazen biraz daha sağa doğru, bazen biraz daha sola doğru sallıyor kuyruğunu. Sallama frekansını ölçmenin en iyi yolu nedir?

Frekans saniye başı salınımlarla ölçülür, bu yüzden de sabit bir zaman aralığında gerçekleşen sallama sayısını ölçmeniz gere-

kır Beş saniye bekler, on kuyruk sallama ölçerseniz, bu saniye-  
de iki salınma denk gelen bir frekansıdır. Gerçi böyle bir ölçüm-  
de her zaman bir belirsizlik olacaktır. On salınma saydınız diye-  
lim, bu gerçekten de eksiksiz on salınma mıydı yoksa on ve biraz  
daha fazla mı salınım söz konusuydu? Köpeğinizin kuyruğu tam  
sığa doğru mu gitti, yoksa o süre zarfında daha da uzaga mı sal-  
ladı kuyrugunu?

Bu belirsizliği en aza indirmek için, daha uzun bir süre bo-  
yunca izlemeniz gerekir. Kuyruk sallama sayımınızdaki belirsiz-  
lik, daimi olma eğilimindedir, diyelim ki kuyruk sallama sayısı-  
nın onda biri kadardır, bu yüzden de ne kadar fazla salınım sayar-  
sanız, görece belirsizlik konusunda daha iyisini yaparsınız.

Beş saniye boyunca bir kuyruğun sallanmasını izler de on artı-  
eksi onda bir salınım sayarsanız, ölçtüğünüz frekans şudur

$$f = (10 \pm 0,1 \text{ salınım}) / (5 \text{ saniye}) = 2,00 \pm 0,02 \text{ Hz}^1$$

Başka bir deyişle frekans saniyede 1,98 ile 2,02 salınım ara-  
sındadır.

Elli saniye boyunca seyrederse (köpeğin sabırsızlıktan pat-  
lamadığını varsayıyoruz), yüz artı-eksi onda bir kuyruk sallama  
ölçersiniz; bu durumda frekans şudur:

$$f = (100 \pm 0,1 \text{ salınım}) / (50 \text{ saniye}) = 2,000 \pm 0,002 \text{ Hz}$$

Ölçtüğünüz salınım sayısının artması, frekansın belirsizliğin-  
de bir azalmaya, köpeğin ne kadar mutlu olduğunu daha kesin  
olarak belirlemeye yol açar.

Frekansın belirsizliğindeki bu azalmanın bedeli, zaman belir-  
sizliğinde bir artıştır. Enerji belirsizliğinin onda birini elde etmek

1- Frekans birimi "Hertz" Hz olarak kısaltılır. Işığın elektromanyetik bir dal-  
ga olduğunu deneysel olarak gösteren ilk fizikçi olan Alman fizikçi Heinrich  
Hertz'e atfen verilmiş bir addır.

ışık, ölçümü yapmaya on kat daha fazla zaman harcadınız, bu da frekansı ne zaman ölçtüğünüzü kesin olarak söyleyemeyeceğiniz anlamına gelir. O eili saniyedeki ortalama frekansı biliyorsunuz, ama belli bir anı gösterip o sırada frekansın 2 Hertz olduğunu söyleyemezsiniz. Söyleyebileceğiniz tek şey o süre zarfında frekansın yaklaşık 2 Hz olduğudur, ama belli bir anda frekans daha hızlı ya da daha yavaş olabilir.

Ölçüm süresi konusunda daha kesin olabilirsiniz, örneğin sadece yarım saniye boyunca izleyip bir kuyruk sallama ölçebilirsiniz. Ama o zaman da frekans belirsizliği daha büyük olur,  $f = 2,0 \pm 0,2$  Hz. Hem salınımın frekansında hem ölçüm süresinde küçük bir belirsizlik elde edemezsiniz.

Aynı mantık salınımları elle sayılamayacak kadar hızlı olsa da ışığın frekansının ölçümünde de geçerlidir. Işık ile atomlar arasındaki etkileşimde bu belirsizlik ilkesinin doğrudan iş başında olduğunu görürüz. İkinci ve üçüncü bölümlerden, atomların ancak belli mümkün enerji durumlarında bulunabileceğini; bu durumlar arasında foton yutarak ya da salarak geçiş yaptıklarını biliyoruz.

Bir atom bir yüksek enerji durumundan düşük enerji durumuna geçerse, saldığı fotonun frekansı, iki durum arasındaki enerji farklılığıyla belirlenir. Fakat bu enerji farklılığının, atomun yüksek enerji durumunda ne kadar zaman kaldığına dayanan bir belirsizliği vardır. Aynı yüksek enerji durumuna yerleştirilmiş birbirinin aynı iki atom, frekansları çok hafif farklılıklar gösteren fotonlar salabilir.

Farklılık çok küçüktür, tıpkı atomlar açısından, fotonların frekansının yüz milyonda biri kadardır. Bu farklılık, lazer kullanarak ölçülebilir. Bu küçük frekans belirsizliği atomik özelliklere dair kesin ölçümler yapma becerimizi sınırlar.

Yani şeyleri saymak biraz zaman alıyor. Büyük işmiş lyi

de bütün bunların peynirden yapılmış tavşancıklarla ne alakası var?"

"Frekans sayımı örneğin, daha genel bir ilkeye verilmiş bir örnek yalnızca. Enerji-zaman belirsizliği, enerjinin hangi biçimi söz konusu olursa olsun geçerlidir."

"Nedenmiş o?"

"Bak şimdi, bütün enerji biçimlerinin eşdeğer olması gerekir, çünkü bir enerji biçimini diğerine çevirebilirsin. Enerjisi kesin olmayan bir fotonun varsa, bu fotonu bir elektronu hareket ettirmek için kullanırsan, o elektronun kinetik enerjisi de belirsiz olmalıdır."

"Ben yine anlamadım, bunun tavşanlarla ne alakası var?"

"Einstein'ın görelilik kuramından kütle ile enerjinin eşdeğer olduğunu biliyoruz."

" $E=mc^2$ !"

"Aynen öyle. Kütle enerjinin sadece başka bir biçimi olduğundan, enerjiyi kütleye, kütleyi de enerjiye çevirebilirsin. Başka bütün enerji biçimleri gibi kütle'nin de bir belirsizliği vardır ve bu belirsizlik, kütle'nin ne kadar zamandır var olduğuyla ilgilidir."

"Yani peynirden yapılmış bir tavşancığın belirsiz bir kutlesi mi olur?"

"Öyle. Kısa bir süredir varsa bu belirsizlik çok yüksek olacaktır, sadece  $10^{-23}$  saniye var olan üst kuark gibi bir şey için bu şeyin ömrünün bu kadar sürmesinden kaynaklanan belirsizlik toplam kütle'sinin yüzde 1'ine eşittir."

"Peki ya uzun zamandır varsa, o zaman kütle'nin belirsizliği küçük mü olur? Kütle belirsizliği az olan peynirden bir tavşancık isterim ben!"

"Eh, sana iyi şanslar! Peynirden yapılmış bir tavşancığın ömrü son derece kısa olur."

"Ah, iyi noktaya parmak bastın."



## İnsanlar Uzaktayken...: Sanal Parçacıklar

Peki, buradan peynirden yapılmış tavşancıklara nasıl geliriz? Bu belirsizlik ilkesini boş uzaya uyguladığımızı düşünelim. Uzun bir süre boyunca küçük bir bölgeye bakarsak, oranın boş olduğundan gavet emin olabiliriz. Fakat kısa bir süre boyunca bakarsak boş olmadığını kesin olarak söyleyemeyiz. Uzayın o bölümü bazı parçacıklar içeriyor olabilir, kuantum mekanığında bu oyle olacağı anlamına gelir.

Uzayın boşluğuyla ilgili belirsizlik ilk başta görünebileceği kadar tuhaf değildir. Bir fizikçi ya da sahnede gösteriler yapan bir sihirbaz bir köpeğe rahat rahat inceleyeceği bir kutu verirse köpek kesin olarak kutunun boş olduğu sonucuna varabilir. Kutunun bütün köşelerini koklar, sahte düğmeleri kontrol eder, minik gırtlara hiçbir şeyin gizlenmemiş olduğundan kesinlikle emin olur. Gelgelelim kutuya sadece bir göz atmasına ya da içini çabucak koklamasına izin verilirse kutunun boş olduğundan o kadar da emin olamaz. Kutunun bir köşesine, köpeğin o kısacık sürede tespit edemediği bir şey sıkışmış olabilir.

Kutunun boş olup olmadığını belirlemek için gereken süre, bulmayı beklediğiniz şeyin büyüklüğüne de bağlıdır. Kutunun içinde Profesör Schrödinger'in şu meşhur kedisinin bulunup bulunmadığını belirlemek için çok da uzun süre bakmanız gerekmez; ama içinde çok daha küçük bir nesnenin, örneğin bir ödül kırıntısının bulunduğunu yanlışlamak için bakıyorsanız çok daha incelikli bir tefüşe gerek vardır ve bu da zaman alır<sup>3</sup>

Aynı fikir enerji-zaman belirsizliği fikri üzerinden kuantum fizikinde boş uzay açısından da geçerlidir. Boş bir kutuya uzun bir zaman boyunca bakacak olursak içindeki enerjiyi küçük bir

3- Köşelere sıkışmış gerçekten çok küçük kırıntıları koklamakta burunların pek işe yaramayan insanlar için bu çok daha zordur.

belirsizlikle ölçebilir, kutuda hiç parçacık olmadığını, sadece sı-  
fır noktası enerjisi bulunduğunu bilebiliriz. Gelgelelim kısa bir  
sure boyunca bakarsak enerjideki belirsizlik çok büyük olabi-  
lir. Einstein'ın ünlü  $E=mc^2$ 'si gereği enerji kutuyla eşdeğer oldu-  
ğundan, bu, kutunun parçacık içermediğinden emin olamayacağı-  
mız anlamına gelir. Schrödinger'in kedisinde olduğu gibi, kutuda  
olan şeyin kesin halini bilmiyorsak o şey izimli durumların super-  
pozisyonundadır. Kedi hem dışı hem oludur, kutu da aynı anda  
hem boştur hem de her tür parçacıkla doludur.

Başka bir deyişle, onları doğrudan görmemizi mümkün kıl-  
mavacak kadar hızlı belirip kaybolmaları koşuluyla kutuda bazı  
parçacıklar olabilir. Peki, parçacıkların bu kadar uygun bir biçim-  
de kaybolmasını nasıl düzenleriz? Sıradan parçacıklar bizi bakmı-  
yorken kaybolmazlar; tabii eğer yenilmiyorlarsa ve ortalıkta bir  
kopek yoksa.

Bir madde diğeri karşıt madde olarak çiftler halinde gelmeleri  
koşuluyla parçacıklar kutudan kaybolabilir. Evrendeki her parça-  
cığın onunla aynı kutleye sahip, tam tersi yüklü bir karşıt madde  
eşdeğeri vardır; elektronun karşıt parçacığı pozitrondur, proto-  
nun karşıt parçacığıysa karşıt proton, böyle devam eder. Sıradan  
bir madde parçacığı, karşıt parçacığıyla temas ettiğinde iki parça-  
cık birbirlerini ortadan kaldırır; kütleleri enerjiye döner.

Pratik anlamda, bu, bir parçacık ile karşıt parçacığının kutu-  
nun içinde hiçbir şeyden varlık bulabileceği anlamına gelir. Bu  
durum, kutunun içindeki enerji miktarını geçici olarak küçük bir  
miktar artırır, bir elektron-pozitron çifti enerjiyi iki elektron küt-  
lesinin ışık hızının karesiyle çarpımı kadar artırır; fakat iki parça-  
cık birbirlerini yeterince kısa bir sürede imha edebildikleri süre-  
ce sorun yoktur; çünkü enerjideki belirsizlik fazladan iki parça-  
cığı kapsayabilecek kadar büyüktür.

4. Başka bir deyişle, parçacık-karşıt parçacık çifti kısa bir süre için var  
olurlarsa kütlelerinin toplamı bir belirsizlik olur. Süre yeterince kısaysa

[illegible]

“Bence sen bu meseleyi gereğinden fazla karmaşıktlaştırıyor-  
sun. Sıfır parçacıkları ölçmek ne kadar zordur?”

"Akşam yemeğini hazırlarken bir yiyecek molekulu düşürmüş olmamız olasılığı üzerine bütün mutfak zeminini koklaması gereken bir köpek mi soruyor bu soruyu?"

"Ama bazen yiyecek düşünürsünüz, ben de sizin yiyeceklerinizi benimkilerden daha fazla seviyorum "

"Mesele, sıfırı ölçmenin gerçekten de zor olması. Bir şeyin değerinin gerçekten de kesin sıfır olduğunu hiç söyleyemezsin, sadece değerin, ölçümünle ilişkili belirsizlikten büyük olmadığı."

kütlenin behrsizlığı kütleden büyük olabilir, bu durumda kütlenin sıfır olmadığını söyleyemeyiz. Bu durumda da bu kısa süre boyunca var olabilirler, çünkü kütleleri sıfır olan iki parçacık kutunun içindeki enerjiyi artıramaz.

5- Bu hiç anlamı olmayacak kadar kısa bir süredir, bazı ilginç kuramlar-  
da zamanın kendisi de kuantum parçalarına ayrılmıştır ve  $10^{-44}$  saniyelik  
(Planck zamanı) parçalar halinde ele alınır. Bu gibi modellerde bundan  
daha kısa bir zaman aralığının bulunması mümkün değildir.

"Bu şeyler  
da onları  
edemiy  
uzerinde  
Vat  
birbirlerini  
?"

Her T  
Fe  
ve K

parçacıklar, d  
parçacıklar  
mış gibi  
temel duze  
kuantum  
kritik  
elektronla  
arası  
da sulm

ni söyleyebilirsin. Bütün bilimsel kariyerlerini şeylerin sıfır de-  
ğinde olduğunu daha büyük bir kesinlikle ölçmeye harcayan in-  
sanlar vardır "

"Kulağa çok sıkıcı geliyor."

"Bellı bir kişilik tıptı gerektiriyor. Her neyse, bu aynı bir mese-  
le çünkü sanal parçacıkların var olduğunu biliyoruz, etkilerini  
gözlemleyebiliyoruz."

"Bir dakika.. Bu şeyler çok kısa bir süre boyunca var oluyor-  
arsa nasıl oluyor da onları tespit edebiliyorsunuz?"

"Onları tespit edemiyoruz, doğrudan yapamıyoruz bunu Baş-  
ka parçacıklar üzerindeki etkilerini görebildiğimiz için var ol-  
duklarını biliyoruz Var olup kaybolan sanal parçacıklar gerçek  
parçacıkların birbirleriyle etkileşim biçimlerini değiştiriyorlar "

"O nasıl oluyor?"

"Bak "

### **Her Tablo Bir Hikaye Anlatır: Feynman Diyagramları ve Kuantum Elektrodinamiği**

Sanal parçacıklar; doğrudan görülemeyecek kadar hızlı belirlip  
kaybolan parçacıklar, ciddi bir bilimsel kuram için fazlasıyla ha-  
yal ürünüymüş gibi görünebilir. Aslına bakarsanız, bu parçacık-  
ların, en temel düzeyde ışık ile madde arasındaki etkileşimi be-  
tümleyen, kuantum elektrodinamiği olarak bilinen kuram açısın-  
dan kesinlikle kritik önemde bir yönü vardır. Kuantum elektro-  
dinamiği elektronlar arasındaki, elektronlarla elektrik ya da man-  
yetik alanlar arasındaki bütün etkileşimleri elektronların foton  
yutması ya da salmasıyla betimler.

Kuantum elektrodinamiğinin en tanınmış biçimi, ünlü fizik-  
çi ve renkli karakter Richard Feynman ın adıyla anılan Feynman



diyagramlarına dayanır. Feynman bu diyagramları, hesaplamaya yönelik bir tür kestirme yol olarak geliştirmiştir. Bu diyagramlar karmaşık hesaplamaları, parçacıklar etkileşim kurduğunda neler olduğunu hikâye eden tablolar halinde sunar. Bir elektronun bir elektrik ya da manyetik alanla etkileşimini konu alan en basit Feynman diyagramı şöyle görünür.

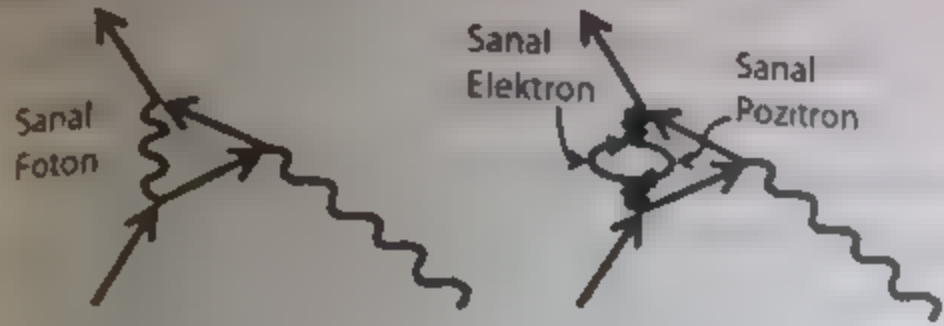


Düz çizgiler, uzayın bir bölgesinde hareket eden bir elektronu gösterir, zıgzaklı çizgiyse elektromanyetik alandan çıkmış bir fotonu gösterir. Bu diyagramda zaman tablonun altından yukarıya doğru akar; yatay yön uzayda hareketi gösterir, böylece diyagram kendisini resimli bir hikâye gibi anlatır. "Bir zamanlar bir elektron vardı, bir fotonla etkileşime girdi ve hareket yönünü değiştirdi."

Bu küçük hikâyenin ne kadar sıkıcı olursa olsun, ışıkla etkileşim içine giren bir elektrona neler olduğunu anlatan eksiksiz bir

6- Feynman fizığe çok sezgisel yaklaşmasıyla unluuydu, geliştirdiği diyagramlara dayalı teknik de büyük bir kabul gördü çünkü kuantum elektrodinamığı için gerekli karmaşık hesaplamaları düşünmenin uygun bir biçimini sunuyordu. Feynman kendi çalışmalarını yürüttüğü sırada Julian Schwinger aynı problemlerle ilgili daha formel bir yaklaşım geliştirdi. Feynman yaklaşımının vardığı sonuçların ayrıntılarını matematiksel olarak daha katı bir yaklaşımla veriyordu. Bugün kuramsal fizikte her iki yaklaşım da yaygın olarak kullanılır. Feynman ile Schwinger 1965 Nobel Ödülü'nü Schwinger'in geliştirdiği tekniklerin bazılarını bağımsız olarak geliştirmiş Shin-ichiro Tomonaga'yla paylaştılar.

tablo olduğunu düşünebilirsiniz; ama sanal parçacıklar sayesinde çok sayıda başka olasılık bulunduğu anlaşılmaktadır. Örneğin şu gibi diyagramlar olabilir



Bu diyagramlar daha olaylı hikâyeler anlatmaktadır: Solda elektronumuz uzayda hareket etmektedir, elektromanyetik alandan gelen fotonla etkileşime girmeden önce sanal bir foton salar ve yönünü değiştirir. Sonra alandan gelen gerçek bir fotonu yutar yeniden yön değiştirir; sonra daha önce saldıgı sanal bir fotonu yeniden yutar. Sağdaki diyagram daha da tuhaftır: Sanal foton bir elektron-pozitron çiftine dönüşür, sonra bu parçacıklar birbirlerini ortadan kaldırırlar ve tekrar bir fotona dönüşürler ve bu foton da yeniden yutulur.

Bu diyagramlar sanal parçacıklarla normal fizik kanunları arasındaki tuhaf ilişkiyi göstermektedir. Sanal parçacıklar, bazı temel fizik kurallarına uymuyormuş gibi görünür; gerçek bir elektron hiçbir zaman bir fotonun onune geçip onu yeniden yutacak kadar hızlı hareket edemez; ama sanal parçacıklar enerji-zaman belirsizliğini çiğneyecek kadar uzunca bir süre ortalıkta bulunmadıklarından bu kuralları kırabilirler. Bu durum, tıpkı bir ko-

7. Bir Feynman diyagramında "hikâve"nin son bulmasından önce belirlip kaybolan bir parçacık "sanal bir parçacıktır."

8. Bir pozitron matematiksel olarak zamanda geriye doğru giden bir elektron olarak tanımlanabilir, bu da Feynman'ın geliştirdiği bir numaradır. Okun aşağıya gösterenlerin sebebi budur.

pekle mobilyalar arasındaki ilişkiye benzer. İnsanlar hakıyorlarsa kanepenin üzerinde olmak kesinlikle yasaktır, ama etrafta insanlar olmadığı sürece, köpek onlar kendisini görmeden kanepeden kalkabildiği sürece kanepede kestirmek için muhteşem bir yerdir.

Feynman diyagramlarının her biri bir elektrik ya da manyetik alandan gelen bir fotonla etkileşim içine giren bir elektrona neler olabileceğine ilişkin hikâyenin küçük bir parçasını gösterir. Bu diyagramların her biri, kuantum elektrodinamiğinde elektronun nihai enerjisini veren bir hesaplamayı ve resmedilen olayların gerçekleşme olasılığını temsil eder. Sanal parçacıkların sayısını artırdığınızda diyagramlar daha az olası hale gelir, ama çok çabuk gerçekleşmeleri koşuluyla olası olmayı sürdürürler.

Önceki sayfadaki diyagramlarda sadece elektronlar, pozitronlar ve fotonlar vardı, ama herhangi bir parçacık sanal parçacık olabilir. Bir parçacığın belirme olasılığı kutlesinin artmasıyla birlikte azalır, bu yüzden sanal bir proton-karşıt proton çiftinin belirmesi sanal bir elektron-pozitron çiftinin belirmesi olasılığından daha düşüktür (bir protonun kutlesi bir elektronun kutlesinin neredeyse 2000 katı kadardır), fakat prensipte bir sınır yoktur. Yeterince uzun süre beklerseniz her tür nesnenin bir sanal parçacık olarak görünmesini beklemelisiniz, peynirden yapılmış tavşanların bile.

"Anlaşıldı, sanal parçacıklar elektronların fotonlarla etkileşim kurma biçimini etkiliyor. Çok mühim. Neden umrumda olsun ki?"

"Bu Feynman diyagramlarındaki fotonlar herhangi bir elektrik ya da manyetik etkileşimi temsil edebilir. Bu diyagramlar başka bir elektrona ya da bir protonla etkileşim içinde olan bir elektrona betimleyebilir ve bu da hep olur."

"İyi, ama neden bahsettiğine dair hiçbir fikrim yok."

"Bak şimdi, kuantum elektrodinamiğiyle uğraşıyorsan etkileşimlerden parçacıkların alışverişi olarak bahsedersin. Birbirini

İki elektron bunu, birbirlerine bir foton geçirerek yapar; biri bir foton salar, bu foton öbürüne gider, o da bu fotonu yutar. Yutma ve salma momentumu değiştirir ve biz de bunu iki parçacığı avıran bir kuvvet olarak görürüz "

"Bu kulğa biraz karmaşık geliyor. Neden meseleyi bu şekilde düşünüyüm ki?"

"Matematiksel olarak daha uygun olduğu anlaşıyor da onun için Bunu, hiçbir şeyin ışıktan hızlı hareket edemeyeceğini kurama dahil etmenin bir yolu olarak da görebilirsin. Elektrik kuvvetlerine ilişkin, Einstein'dan önce geliştirilmiş olan tabloda, bir elektronun konumunu değiştirdiğinde ne kadar uzakta olursa olsun diğer elektron üzerindeki kuvvetin de anında değişmesi gerekiyordu Bu da hiçbir şeyin ışıktan daha hızlı aktarılamayacağını söyleyen görelilik kuramına ters düşer."

"Ya, bak bu bir sorun."

"Haklısın. Ama kuvvetlerin, bir parçacıktan diğerine geçen fotonlardan kaynaklandığını düşünürsek sorunun icabına bakmış oluruz. Fotonlar ışık hızıyla yol alır ve kuvvet de fotonlar oraya ulaşınca kadar değişmez."

"Yani bu diyagramlardaki fotonlar..."

"Elektronun bir mıknatısla ya da elektrik alanıyla etkileşiminden kaynaklanan gerçek fotonlar olabilirler, ya da bir başka elektronun saldırdığı fotonlar olabilirler. Hangisi olursa olsun, etki aynıdır, sanal parçacıkların varlığı etkileşimi değiştirir ve biz de bunu tespit edebiliriz "

"Ama bunu nasıl tespit edeceğimizi hâlâ açıklamadın."

"Oraya geliyorum. Kesip durmazsan . "



## Tarihin En Kesin Test Edilmiş Kuramı: Kuantum Elektrodinamiğinin Deneysel Olarak Doğrulanması

Sanal parçacıklar son derece kısa bir süre zarfında, bizim doğru-  
dan gözleyebileceğimizden daha hızlı gelip giderler. Ama elekt-  
ronların sanal parçacıklarla etkileşimleri, kendi etkileşim biçim-  
lerini değiştirdiği için bu parçacıkların var olduklarını biliyoruz.  
Etki kuşucüdür; ama onu ölçebiliriz ve ölçümler deneysel göz-  
lemlerle on dört ondalık basamağa kadar uygunluk göstermek-  
tedir. Bu deneyler kuantum elektrodinamiğinin doğru olduğunu  
kanıtlamakla kalmazlar, milyar dolarlık parçacık hızlandırıcılar  
kullanmaksızın yeni atomaltı parçacıkların varlığını tespit etme-  
nin de bir yolunu sunarlar.

Peki, işleyiş nasıldır? Sanal parçacıklar çok kısa bir süre için  
var olduklarından, belli bir elektron için birçok olasılıktan han-  
gisinin gerçekleştiğini bilemeyiz. Kuantum mekanığı bize bir par-  
çacığın kesin durumunu bilmiyorsa bütün olası durumların bir  
bileşiminde bulunduğunu söyler, daha önceki bölümlerde tar-  
tıştığımız üzere bir superpozisyon durumunda. Bu yüzden, bir  
elektronun bir elektrik ya da manyetik alanla etkileşiminin et-  
kisini hesapladıklarında fizikçilerin bu süreci betimleyen bütün  
olası Feynman diyagramlarını hesaba dahil etmeleri gerekir<sup>9</sup>.

Bir anlamda elektron A noktasından B noktasına geçerken  
aynı anda A'dan B'ye giden bütün olası yollardan geçer. Tek bir  
gerçek fotonu yutar, sonra sanal bir foton salıp onu yeniden vur-  
tar ve bu sanal foton bir elektron-pozitron çiftine hem doner hem  
donmez, bunun gibi. Bu süreçlerin hepsi de olasıdır, bu yüzden

9- Elbette ki olabilecek sonsuz sayıda şey vardır, bu yüzden de sonsuz sayı  
da olası diyagram. Fakat pratikte diyagram ne kadar karmaşık olursa cevabın  
katkısı da o kadar az olur. Bu yüzden kuramsal fizikçilerin sadece deneyin  
kesinliğini karşılamaya yetecek kadar sayıda diyagramı toplamaları gerekir.

hepsi de Feynman diyagramlarının süperpozisyonuna katkıda bulunur

Bunu düşünmenin bir başka yolu, gerçek bir fotonun tek bir fotonla etkileşim içine girdiğini hiç görmediğimizin üstünde durmaktır: gördüğümüz şey daha ziyade, birçok kere tekrarlanmış etkileşimlerin toplam etkisidir. Bu etkileşimlerin her birini ayrıntılı olarak izleyebilseydik çoğu kez elektronun fotonu yuttuğunu, sanal işlerin olmadığını görürdük. Belki on binde bir kez elektronumuz sanal bir foton salardı. Sanal foton, on binde bir sanal bir elektron-pozitron çifti yaratırdı ve böyle devam ederdi. Bu farklı süreçlerden birine her rastladığınızda bu süreç toplam enerjiyi küçük bir miktar değiştırırdi ve bunun değerlendirmeye alınması gerekirdi.

Bu bakış açısına göre, elektron sokakta yürüyen bir köpek gibidir. Köpeğin belli bir bitkiyi koklamak için durma olasılığı çok azdır,<sup>10</sup> ama bir banlıyo caddesinin kenarlarında onlarca bitki vardır, içlerinden biri mutlaka buyuleyici bir koku saçıyor ve daha fazla incelenmeyi hak ediyordur. Tasmayı tutan insanın vurruşu planlarken bu ertelemeyi dikkate alması gerekir.

Gerçek bir elektronun etkileşimlerinin her birini, sanal parçacıkların kaç kere etkileşime dahil olduğunu belirleyecek kadar ayrıntılı inceleme becerisine sahip değiliz, ıpkı köpeğin hangi bitkileri koklamak için duracağını kesin olarak tahmin etme becerisinden yoksun olduğumuz gibi, ama bunun etkileşim üzerindeki etkisinin bir modelini çıkarabiliriz. Feynman diyagramlarının toplanması, elektronun enerjisinde gerçek bir foton yutmaktan ileri gelen ortalama değişimi hesaplamak olarak düşünülebilir. Ardından, sanal parçacıkların dahil olduğu ve da olmadığı süreçlerle birçok fotonun yutulmasının toplam etkisini, aynı ortalama enerjiyle bir dizi yutulma olarak betimleriz, ıpkı bir köpe-

10- Bir basset hound değilse tabii, eğer ovleyse her şeyi koklamak isteyecektir.

gün ilerlemesini ortalama bir blokta üç kez duracağını söyleyerek betimlediğimiz gibi Kopeğimiz bazı bloklarda beş kere durabilir, bazılarında sadece bir kere durabilir, ama bütün yürüyüş boyunca bunun etkisi her blokta üç kere durmuş olmasının etkisiyle aynıdır.

Bunu, ister bütün olası yolların aynı andaki bir superpozisyonu ister ortalama etkileşimin tek tek birçok etkileşimin ayrıntılarını kapsamak için kullanılması olarak düşünün, sanal parçacıkların etkisi, bir elektronun bir manyetik alanla etkileşimine baktığımızda kendisini gösterir. Elektronların (ve başka bütün maddi parçacıkların) kuzey ve güney kutupları olan minicik mıknatıslar gibi davranmalarına neden olan, "spin" denilen bir özellikleri vardır<sup>11</sup> Kutupları manyetik alanla uyumlu olan bir elektronun enerjisi, kutupları ters yönü gösteren bir elektronun enerjisinden çok küçük bir oranda farklıdır.

Manyetik bir alanda, bu haller arasındaki enerji farklılığı, elektronun jromanyetik oranı ya da g-faktörü denilen bir rakama dayanır, bu rakam temelde size belli bir "spin" sayısı için ne kadar büyük bir mıknatıs elde edeceğinizi söyler. En basit kuantum elektron kuramı, bu oranın değerinin tam olarak 2 olması gerektiğini söyler, hiç sanal parçacık olmadığında bu değeri alırsınız. Sanal parçacıkların katkısı sayesinde, asıl değer azıcık daha yüksektir.

Bu değer, olaganüstü bir kesinlikle ölçülebilir. 2008'de Harvard'dan Gerald Gabrielse başkanlığında bir fizikçi ekibi, bir Penning kapaında tutulan tek tek elektronların kullanıldığı deneylerde, o zamana kadarki en doğru elektron g-faktörü ölçümünü gerçekleştirdi. Gözlemledikleri deneysel değer şuydu

11- Bu özelliğe "spin" adı verilmesinin nedeni elektron dönen bir elektrik yükü topu olsaydı göreceğiniz şey yuzundadır. Elektronlar kelimenin tam anlamıyla dönmeyiz, ama bu özellik için dönmeleri halindeki matematik aynıdır.

$$g=2,00231930436146 + 0,000000000000056$$

Vardıkları sonucu, yukarıda anlattıklarımızdan daha karmaşık süreçleri içeren neredeyse 1000 ayrı Feynman diyagramının toplanmasını gerektiren bir kuantum elektrodinamiği hesaplamasının<sup>12</sup> sonucuyla karşılaştırdılar, kuram ve deney mukemmel bir uyum gösterdi, on dört ondalık basamağa kadar bir uyuşma vardı. İlk bakışta bu fikir ne kadar tuhaf görünurse görünsün, sanal parçacıkların var olduğunu söylerken kendimizden emin olmamızın sebebi budur.

Bu uyuşma son derece etkileyici olsa da bir uyuşmazlık daha da ilginç olurdu. Elektronun g faktörü sadece sanal fotonların ve sanal elektron-pozitron çiftlerinin etkilerini içerir, ama muon, elektrona benzeyen, ama ondan daha kutleli olan bir parçacık tipi için aynı nicelik başka birçok daha ilginç sanal parçacığın etkisini gösterir.<sup>13</sup> Muonun g-faktörüne ilişkin son ölçümler, deneysel değer ile kuramsal tahmin arasında küçük bir farklılık olduğunu göstermektedir. Bu farklılık sadece bir hesaplama ya da ölçüm hatası olabilir; veya hesaplamalara dahil edilmemiş, parçacık fiziğindeki standart modelde yer almayan yeni bir parçacığın varlığına işaret ediyor olabilir. Henüz kesin bir şey söylemek için çok erken; fakat bu farklılık başka ölçümlerde de varlığını korursa standart modelin ötesindeki fizik için birçok kuramın ilk deneysel testi olabilir.

Elbette ki peynirden yapılmış sanal tavşancıkların etkilerini görmeye başlamak için deneycilerin alması gereken çok yol var. Ama peynirden tavşanlar mümkün olsaydı bunların oralarda bir

12- Cornell'de Torichiro Kinoshita'nın grubunun gerçekleştirdiği başlı başına etkileyici bir başarıdır bu.

13- Muon g-faktörü hesaplamaları sanal müonları, tau parçacıklarını, kuarkları ve gluonları içerir; bunlar bilinen atomalı parçacık tiplerinin büyük bölümünü oluşturur.



yerlerde olmaları gerektiğini bilirdik.

"Peki, o zaman 'Kuantum mekanığı kuramlar tarihinde en doğru biçimde sınanmış kuramdır' derken ne demek istiyorsun?"

"Ben öyle demedim..."

'Her ne dediyse' Hep aynı şeyi sovluyorsun, gerçekten de hava atıyormuşsun gibi geliyor kulağa "

"İyi Bir daha gobegini kaşırsam.. Her neyse, evet, demek istediğim o aslında Elektronun g-faktorunu on dört ondalık basamağa varıncaya kadar tahmin etmekte kuantum elektrodinamığı kullanılmıştır ve elde edilen değer deneysel ölçümlerle mu-kemmel bir uyum göstermiştir Kuantum elektrodinamığı, ola-gan kuantum mekanığının, görehilik hakkında düşünmeyi gerek-tiren durumları içeren nispeten doğrudan uzantısıdır "

"Başka ne faydası var kı?"

"Daha önce söylediğim gibi, sanal parçacıklar gibi her turden farklı şeyle karşılaşabilirsin. Bunlara kuramcılar tahmin edip henüz gözlemlemediği parçacıklar da dahildir; bu parçacıklar gerçekten varlarsa sanal parçacıklar olarak boy göstereceklerdir."

"E bunun ne faydası var?"

"Bu varsayımsal parçacıkların bazıları, bildiğimiz parçacıkların hiçbirıyla mumkun olmayan etkileşimleri mumkun kılacaklardır Muon g-faktorunun yanı sıra elektronun 'elektrik dipol momentı' vardır. Doğru turde parçacıklar var olurlarsa, bunlar, elektronun atomlar ve molekullerin içindeki elektrik alanlarıyla etkileşime girme biçimlerini değiştireceklerdir. Deneylerde izin-li durumlardaki küçük değişimi lazerlerle tespit etmek mumkun olabilir."

"Yani, bu dipol momentı mı her ne karın ağrısıysa onu görün-ce yeni parçacıkların var olduğunu mu anlarsın?"

"Tabii, görmezsen de bazı parçacık tiplerini ortadan kaldırabi-lirsin Bir elektronda kimsenin bir elektrik dipol momentı gör-memiş olması, kuramcıların kullanmayı sevdiği bazı basit model-

leri ortadan kaldırmıştır. Yeni deneylerde bir şeyin görülmemesi kuramcılarının başını gerçekten ağrıtabilir "

"Çok iyi "

"Çok iyi tabii, çünkü bunlar milyar dolarlık parçacık hızlandırıcılarla değil masa başında yapılan deneyler Berkeley'de, Yale'de, Washington'da, Colorado'da bu deneyleri yapan birçok grup var. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı işlemeye başlavinca kadar, belki onun da ötesinde gerçekten yeni bir şeyler öğrenme konusunda en iyi fırsatı bunlar sunuyor."

"Tabii bunların hiçbirinin gerçekten önemli şeylere bir faydası yok "

"Neymiş o?"

"Bana peynirden bir tavşan bulmak."

"Eh, ne diyebilirim ki? Bazı alanlarda fizikçilerin kat etmesi gereken hâlâ uzun bir yol var "

"Ben de onu diyecektim."

## Kötü Sincaplara Dikkat: Kuantum Fiziğinin Kötüye Kullanılması



Sincap geçirmez kuş yemliğine yem koyuyordum ki başımın üstünde incecik bir ses duydum. "Şşşt! Hey, insan kardeş!"

Bir ağacın dalına tünemiş, bana bakan bir sincap. Etrafıma bakmıyorum, ama Emmy bahçenin öbür tarafında; büyük meşe ağacının dibini kokluyor "Ne istiyorsun?" diye soruyorum

"Bana o yemlerin birazını vermeye ne dersin?"

"Hiç sanmıyorum. Yüzünde ne var senin? Keçi sakal mı o?"

"Sahte canım Köpeğin kafasını karıştırmak için takıyoruz. başka bir boyuttan geldiğimizi sanıyor. Baksana, o zaman biraz yem satmaya ne dersin?"

"Bir sincap kuş yemini neyle alır ki?"

"Bedava enerjiye ne dersin, ha?" Sahte keçi sakalına, kabarık kuyruğuna, öne çıkmış dişlerine rağmen bir şekilde kendinden emin görünmeyi başarıyor.

"Bedava enerji mi?"

"Tabii ya! Bildiğimiz suyla neredeyse sonsuz miktarda enerji elde etmek için ne yapman gerektiğini anlatabiliriz. Biraz kuş yemine değer ha?"

"Gerçekten Bedava enerji "

"Bildin Su moleküllerinden sıfır-noktada titreşimsel enerji alıyor, onları sıradan moleküllerden daha düşük bir enerji halinde bırakıyoruz. Bu enerjiyi doğruca elektriğe çevirebilir, ampulleri yakmak, bilgisayarları ya da kuş yemi yapan makineleri çalıştırmak için kullanabilirsin." Yakından baktığımda şu sahte keçi sakalın belirgin bir biçimde iple tuturulduğunu görüyorum.

"Gerçek olamavacak kadar ıvı geliyor kulağa. Ücunda ne var bunun? Zehirli atık ürünler mi?"

"Hayır, hayır. tek atık durgun su. Aslına bakarsan sudan daha iyi. Super su!"

"Neymiş o kadar super olan?"

"Bak şimdi farklı bir kuantum halinde ya? Bu yüzden de özel bazı özellikleri falan var. İçersen hastalıklarını iyileştirebilirsin."

"O nasıl oluyormuş?"

"Bak, içiyorsun bu suyu, sonra dalga fonksiyonunu sağlıklı bir halde ölçmeye odaklanıyorsun. Doğru düzgün yaparsan mukemmel bir sağlığa kavuşuyorsun."

"Deme."

"Yaa! Aynen öyle. Bazı atolye çalışmalarımız, derslerimiz falan var. Ben yüz altı yaşındayım, sağlığım da mukemmel. Haftada bir avuç kuş yemine senin de bu sırrı edinmeni sağlayabiliriz."

"Hı hı." Köpeğim halâ bahçenin öbür tarafında, tavşan bulmak için çalılıkların arasına bakınıyor.

"Bir kuantum bilgisayarını çalıştırmak için de kullanabilirsin, ama o kuş yeminden fazlasına patlar. Haftada bir kavanoz fıstık ezmesine, kredi kartı işlemlerinin şifresini kırmak için gereken bir kuantum bilgisayarının şemasına sahip olabilirsin."

"Ooo!"

"Ya Çok ıvı, değil mi?"

"Köpek haklıymış. Siz kötü sincaplarsınız."

"Sanki nasıl yapıldığını bilsen yapmazmışsın gibi. Şu kuş yemine ne dersin?"



"Tabii, sana biraz kuş yemi vereceğim." Yere, ağacın gövdesinden yaklaşık bir buçuk metre uzaga bir avuç kuş yemi koyuyorum.

"İsekkurler ahbap!" diyor sincap, ağaçtan inerken "Kral-sın."

"Lafı bile olmaz," diyorum, ağaçla sincabın arasına girerken "Emmy!" Bahçenin obur yanından kafasını kaldırıyor. Bak! Kotu bir sincap!"

"Ooo!" Bahçeyi uçarcasına aşıyor, dişleri parlıyor. Sincap ağaca koşmaya çalışıyor, ama yolunu kapatıyorum. Donup bahçenin arka tarafındaki akça ağaca doğru kaçıyor, kopek dişlerini kuyruğuna takmış.

Çimenlerin üzerinde bir şey görüyorum, eğilip alıyorum. Küçük bir sahte keçi sakal. Eve dönerken yol üzerinde çöp kutusuna fırlatıyorum.

Önceki bölümlerde kuantum mekaniğinin birçok tuhaf ve hanka özelliğinden bahsettik. Dalga-parçacık ikiliği, kuantum ölçümü, EPR korelasyonları, sanal parçacıklar, kuantum kuramının birçok yönü gündelik deneyimlerimize ters düşer, o kadar ki kuantum mekaniği sihirliymiş gibi görünmeye başlar. Normal kuralların hiçbirini geçerli değilmiş gibi görünür, kesinlikle her şey mümkünmüş gibi gelebilir.

Kuantum mekaniğiyle ilgili yaygın bir yanlış anlamadır bu. birçok yerde tekrarlandığını görebilirsiniz. Google'da biraz zaman harcarsanız, hiçbir şeyden enerji üretmenin, sağlığını iyileştirmenin, hatta zenginlik ve güç kazanmanın "kuantum" yöntemlerini öneren onlarca siteyle karşılaşabilirsiniz. Kuantum mekaniğini sihirliymiş gibi sunarak para kazanan çok fazla insan vardır.

Ama kuantum mekaniği sihir değildir. Ne kadar olasılık dışı ya da şaşırtıcı görünurse görünsün kuantum mekaniği genel fizik ilkelerine uyması gereken bilimsel bir kuramdır. Bir fenome-

nın ya da aygıtın tanımındaki "kuantum" kelimesi, o fenomenin ya da aygıtın hiçbir şeyden enerji yaratmasını ya da ışıktan hızlı mesaj göndermesini mümkün kılamaz. Bu ilkeler evrenin yapısının derinlerindedir. Kuantum mekaniği bu kurallara uygun olmakla kalmaz, bazı durumlarda bu kurallar kuantum davranışından doğar.

Kuantum mekaniğinin birçok tahmini, dünyanın nasıl işlediğine dair gündelik sezgilerimize ters düşüyormuş gibi görünse de sağduyunun bütün kurallarını askıya almazlar. Özellikle de dünyayla başa çıkma konusunda en önemli sağduyu kuralını aşmazlar. Bir şey kulağınıza gerçek olamayacak kadar iyi geliyorsa, neredeyse kesinlikle öyledir.

Bu kitabın büyük bir bölümünü kuantum kuramının harika yönlerinden bahsetmeye harcadık; ama sözlerimi uyarıcı bir notla bitirmek istiyorum. Kuantum mekaniğinin sahte bir versiyonunu sıhırmış gibi satan, en çılgın gerçek dışı hayallerimizin bile ötesinde sonuçlar vaat eden birçok kişi var. Bunların bazıları dolandırıcılık sanatçıları; bazılarıysa iyi niyetli, fakat aldanmış insanlar; gelgelelim hepsi de yanılğı içindeler. Dolandırıcıları kafası karışıklardan ayırmak zor, ama kuantum kuramının sahte versiyonlarını ayırt etmek zor değil; bu bölümde de en olağan problemlerin birkaçına dikkat çekeceğim.

### **Bedava Bir "Kuantum" Yemeği: Bedava Enerji**

Kuantum kuramını kötüye kullanan dolandırıcılık sanatçılarının faaliyet gösterdiği başlıca iki alandan biri "bedava enerji"dir. Bedava enerji dolandırıcıları her zaman, küçük bir miktar işe karşılık büyük miktarlarda enerji üretecek bir plan geliştirdiklerini iddia ederler. Bu plan çok çeşitli biçimler alabilir, ama temel cazibe

sıfır noktası her zaman aynıdır: Çok küçük bir miktarda işe karşılık çok büyük miktarda elektrik alırsınız. Yapmanız gereken tek şey, sistemin prototipini çalıştırmak için küçük bir nakit yatırımında bulunmaktır; sonra da çok geçmeden elektrik şirketinin avcundan kurtuluverirsiniz.

Bu, daimi bir hareket makinesi icat etme iddiasında bulunmaktan başka bir şey değildir; bilim insanları daimi hareket makineleri yapmanın imkânsız olduğunu yüzlerce yıldır biliyor. Kuantum mekanığı bu sonucu değiştirmez.

"Kuantum" daimi hareket makineleri için getirilen en yaygın asılsız açıklama, böyle bir makinenin şu veya bu sistemdeki sıfır noktası enerjisinden yararlandığıdır. Bu sıfır noktası enerjisi, kuantum fizığının, mümkün olan en düşük seviyedeki enerji halindeki bir sistemde bile bulunduğunu söylediği enerjidir. Bir kuantum sisteminden alabileceğiniz bütün enerjiyi aldığınızda, kinetik enerjiyi mümkün olan en düşük değere indirip sistemi potansiyel enerjiyi artıracak etkileşimlerin dışına çıkardığınızda sistemde hâlâ bir miktar enerji kalır.

Göz boyayıcılar, bu sıfır noktası enerjisinden kullanılacak bir kaynakmış gibi bahsetmeye bayılır. "Orada hâlâ enerji var," derler. "Bizim aygıtımız da bu enerjiyi kullanarak daimi hareket makinesinin çalışmasını sağlıyor."

Ama ikinci bölümde sıfır noktası enerjisinin, madde esasen dalgaya benzer olduğu için, kuantum parçacıklarının her zaman bir dalga boyu olması gerektiği için var olduğunu gördük. Bir sistemin enerjisinin gerçekten sıfır olabilmesi için, sistemin belli bir konumda kusursuz bir hareketsizlik içinde olması gerekir; bir dalgayla tanımlanan bir sistem için bu imkânsızdır. Sıfır noktası enerjisi, tıpkı Heisenberg belirsizlik ilkesi gibi maddenin esasen dalga niteliğine sahip olmasının bir sonucudur. Nasıl ki belirsizliğin dayattığı sınırları silmenin bir yolu yoksa yararlı işler yapabilmek için sıfır noktası enerjisini kullanmanın da bir yolu yok-

tur. Sıfır noktası enerjisini kullanmaya çalışmak bir fotonun yarısını istemek gibi bir şevdir, hiçbir anlamı olmayan bir istektir.

Düzmece kuantum kuramıyla bedava enerjinin bugüne kadarki en başarılı savunucusu herhalde Black Light Power adlı şirket olmuştur. Maryland Üniversitesi'nden Bob Park ve Amerikan Fizik Cemiyeti, bu şirketin kurucusu Randell Mills'in iddialarındaki asılsızlıkları ortaya dokmeye neredeyse yirmi yıl harcamıştır; Park'ın *Voodoo Science: The Path from Foolishness to Fraud* (Oxford, 2000) adlı kitabı bu iddialar üzerinedir. Fakat Park'ın bütün çabalarına rağmen Black Light Power şirketi hâlâ faaliyetlerini sürdürmekte, dikkat çekici bir enerji üretim sürecini pazarlamaktadır. Şirketin web sitesine göre bu süreçte, "hidrojen atomlarının elektronları bir katalizör tarafından, kesirli kuantum sayılarına denk gelen düşük enerji seviyelerine geçmeye sevk edilirken (yani, her atomun çekirdeği etrafında düşük yörüngelere inerken) enerji salınır." "Hidrojenler" denilen bu gizemli, düşük enerjili atomların her türden sihirli özelliğe sahip olduğu, yeni yüksek voltajlı pilleri ve mucizevi ışık kaynaklarını mümkün kıldığı iddia edilir. (Bunların hiçbirisi henüz yoktur, ama bugün yarın yapılacakları vaat edilir.)

Butun bu sözlerin etkileyici bir bilimsizliği var, ama bir köpek bile zirva olduğunu söyleyebilir. Hidrojen evrendeki en basit atomdur; bir tek protonun yörüngesinde dönen bir tek elektrondan oluşur. Hidrojenin ilk kuantum modeli 1913'te Niels Bohr tarafından ortaya konmuş; 1920'lerde Schrödinger denklemi kullanılarak tam bir kuantum incelemesi geliştirilmiştir. Kuantum elektrodinamığı hidrojene ilk kez 1947'de uygulanmıştır, hidrojenin modern kuantum elektrodinamığı modelleri de deneysel sonuçlarla, tıpkı elektron g-faktörü ölçümlerinde görülen kesinlikte bir uyum göstermektedir. Hidrojen atomu evrende en iyi anlaşılmiş, en kesin olarak sınanmış sistemlerden biridir.

Modern fizik hidrojende "mevdanda olmayan" hallere imkan



anılmaz Bu gibi hallerin var olabilmesi için temel fizik anlayışımızın kuantum elektrodinamiğinde gördüğümüz üzere deneylerle kuram arasında on dört ondalık basamakla uyumu yakalamayı imkânsız kılacak kadar yanlış olması gerekir

Sık sık atıfta bulunulan bir başka "kuantum" bedava enerji kaynağı "boşluk enerjisidir." Bu, boş uzayın, yani kuantum elektrodinamiğinin gösterdiği üzere içinde sanal parçacıkların var olması gereken, sürekli belirip kaybolan denizin sıfır noktası enerjisini kullanmayı amaçlayan sıfır noktası enerji planının bir başka versiyonudur.

"Boşluk enerjisi" planları "hidrino" enerjisinden daha mümkün değildir. Boş uzayda sanal parçacıklar biçiminde enerji vardır ama bu parçacıklar bir santiyenin minicik bir bölümünde rastgele belirip kayboluverir. İstek üzerine elektronların belirmesini sağlayamayacağımız gibi, işe yarasınlar diye ortalıkta kalmalarını da sağlayamayız. Boşluk enerjisi elektronlar ve başka parçacıklar üzerinde küçük, ama gerçek bir etkiye sahiptir. Eğer bunu kullanılabilecek bir enerji kaynağı değildir.

Datını hareketle ya da "bedava enerji"yle ilgili bir iddia esasın hiçbir şeye karşılık bir şey almanızı öngörür. Her köpek, deninde bir yerde bilir ki bu mümkün değildir; herhangi bir numara yapmadan ödül almanız imkânsızdır. "Kuantum" lafını ortaya atmak temel gerçeği değiştirmez: Hiçbir şey koymadan bir şey alamazsınız. Aksını iddia eden biri bir şey satıyordur.

"Sanırım Hawking ışınlamında olduğu gibi sanal parçacıkların gerçek olabildiğini söylemiştin."

"Onun gibi bir şey demiştim. Fikir şudur: Bir elektron ve pozitron çifti tam bir kara deliğin kenarında belirebilir; öyle ki biri kara deliğin içine düşer, diğeri de kurtulur."

"Doğru. O zaman, elektronlar hiçbir şeyden ortaya çıkıyor."

"Yanlış. Sanal bir elektron Hawking süreciyle gerçek olursa kara delik onu oluşturmak için kutlesinden küçük bir parça kay-

beder Gerçek elektronu yapan enerji boşluk enerjisinden değil, kara delikten gelir. kara delik her seferinde bir parçacığa enerjisini vererek yontulup ufalır."

"O zaman sanırım bir enerji kaynağı olarak pek işe yaramıyor, ha?"

"Hayır, hem de hiç Bir kara deliği çevreleyip kontrol edebildiğini varsaysan bile, başka her şey gibi o da enerji üretim süreciyle tüketip gidecektir Bedava yemek diye bir şey yok."

"Evet var Sen benden hiç yemek ücreti kesmiyorsun. Kahvaltı ücreti de, akşam yemeği ya da atıştırmalıklar için de "

"Sen sevimli olup ekmegini kazanıyorsun "

"Ah tabii Bir de evi kötü sincaplardan koruyorum."

"O da var. Hazır lafı açılmışken..."

### **Sağlıklı Olmaya Giden Yolu Ölçmek: "Kuantum İyileştirme"**

Kuantum mekanığının suistimal edildiği diğer alansa "alternatif" tıptır. Kitapçılar ve internet kuantum mekanığını sağlık, zenginlik ve uzun omrun anahtarı olarak ileri süren insanlarla doludur.

Bu iddiaların en yaygın biçimi kuantum ölçümüyle ilgilidir. Göz boyayıcılar kuantum kuramında, durumların ölçülunceye kadar kesin olmadığına dikkat çekerler. Sonra da sağlığın anahtarının, kendinizi sağlıklı olarak ölçmekte yatıgını savunurlar. Bu düşünme biçimine göre kendiniz üzerinde bir kuantum Zeno etkisi deneyi gerçekleştirerek sonsuza dek yaşayabilirsiniz, sağlığınızın her zaman iyi olduğunu ölçerseniz, kuantum ölçümü hiçbir zaman hastalanmamanızı sağlar.

Bu kuantum sahtekarlığının en iyi örneği, *Kuantum Healing* (Bantam, 1990 / *Kuantum İyileşme*, İnkılâp, 5. basım, 2010) adlı bir kitabı bile bulunan Deepak Chopra'dır; bu kitapta...

ternatif up kitapları dizisinin ilki olmuştur. "Kuantum iyileştirme" nedir diye mi soruyorsunuz? Chopra kendisiyle 1995'te yapılan bir söyleşide bir paragraflık bir açıklama yapıyor:

kuantum iyileştirme, bedenzihni kuantum düzeyinden hareketle iyileştirmektir. Bu, duyuşal düzeyde tezahür etmeyen bir düzeyden hareket etmek anlamına gelir. Bedenlerimiz nihayetinde enformasyon, zekâ ve enerji alanlarıdır. Kuantum iyileştirme yanlış yöne giden bir fikirde bir düzeltme yapabilmek için enerji enformasyonu alanlarında bir değişim yapmayı gerektirir. Kuantum iyileştirme, bilincin bir biçimini, yani zihni iyileştirerek bilincin bir başka biçiminde, yani bedende değişiklikler yapmayı içerir.<sup>1</sup>

Chopra kulağa bilimsel gelen bir sürü terim kullanıyor, ama söyledikleri laf salatasından ibaret. Uzay Yolu'nun eski bölümündeki teknosafsanın bilimsel geçerliliği var bu sözlerde; tek yapmadığıysa bir şeyin "kutupsallığını tersine çevirmek"ten bahsetmek.

Kendisi bu fikirleri alt başlığında "Yaşlanmaya Karşı bir Kuantum Alternatifi" vaat eden *Ageless Body, Timeless Mind* (Harmony 1994 / Yaşlanmaz Beden, Sonsuz Zihin, İnkılap, 1996) adlı kitabında genişletir. Fikirlerinin fiziksel temellerine dair açıklamaları, tarih konusunda etkileyici bir cehalet içinde olduğunu gösterir. "Einstein bize başka bütün maddi nesneler gibi fiziksel bedenin de bir yansıma olduğunu, onu yönlendirmeye çalışmanın golgeyi yakalayıp özü kaçırmak olacağını öğretti," gibi cesur bir iddiada bulunur (orijinal, s. 10). Bu sözler, yedinci bölümde de gördüğümüz üzere, Einstein'ın görüşlerinin neredeyse tam tersini vansıtmaktadır. Kuantum belirsizliği fikri Einstein'ı derinden rahatsız ediyordu; Chopra aslında hiçbir şeyin var olmadığını sa-

1- Bu söyleşi internette <http://www.healthynet.se/interview.asp?ID=167> adresinde bulunabilir, 2008'de alınmıştır.

vunarak bu fikri yeni bir düzeye taşır

Maddi dünyada mutlak bir nicelik olmadığından "orada" bağımsız bir dünya olduğunu söylemek bile hatalıdır. Dünya, onu kaydeden duyusal algının bir yansımasıdır. ( ) Gerçekten "orada" olan sizin tarafınızdan algılanan tarafından yorumlanmayı bekleyen ham "hiçunluluk" verileridir. Fizikçilerin deyişle "kokten muhtlak bir akış" olan bir kuantum çorbası alırsınız. Duyularınızla koklayarak bu çorbayı katı üç boyutlu dünyada pıhtılaştırırsınız. (Original s. 11)

Tekbenciliğe doğru bu alçalma herhalde pıhtılaşmış çorba pek cazip olmadığından kulaga "rahatsız edici" gelse de (Chopra bunu bir sorun değil, bir özellik olarak görür ve şöyle yazıyor: "Algınızı değiştirerek bedeninizi dahil dünyanızı değiştirebilirsiniz" fark etmek inanılmaz derecede özgürleştiricidir. (Original s. 11-12) Başka bir deyişle, hiçbir şey gerçekten var olmadığından pekâlâ sağlıklı, zengin ve genç olabilirsiniz. Bu sadece bir algı, yani ölçüm meselesidir.

Sağlığın iyi olmasını sağlamak için kuantum ölçümünün etkin doğasına başvurarak "kuantum iyileştirme" fikri, iki büyük sorundan mustarıptır. İlk sorun, Chopra ve diğer yazarların kuantum fikirlerini kuantum etkilerini gösteremeyecek kadar büyük sistemlere uygulamalarıdır. Bu kitap boyunca tekrar tekrar gördüğümüz üzere, kuantum etkilerini avırtı edebilmek son derece zordur, incelenen sistem ne kadar büyük olursa kuantum etkilerini görmek de o kadar zor olur. Şimdiye kadar bir kuantum superpozisyonu durumunda görülmüş en büyük nesne yaklaşık bir milyar elektrondan oluşan bir topluluktur (dördüncü bo-

2. Burada çoğunlukla olarak kullanılan "fizikçiler" muhtemelen haklı ve verinde bir tabir değildir. "kokten muhtlak bir akış" olan kuantum çorbası fizikte yaygın bir terim değildir. Görüldüğü kadarıyla bu terimi kullanan tek gerçek fizikçi neyle ilgili olduğunu tahmin edebileceğimiz "kuantum lanita" yazarı süren Nick Herberttir.



kuantum Zeno etkisiyse sadece tek tek parçacıklarda görül-  
müştür (beşinci bölüm)

Fakat asıl büyük sorun, kuantum ölçümlerinin esasen rast-  
sise olmasıdır. Bir ölçüm yapılana kadar bir kuantum sistemi  
n durumu belirsizdir, tek tek ölçümlerin sonucu ise tahmin  
edilemez. İster dalga fonksiyonunun tek bir değere çıktığı ko-  
penhag yorumunu benimseyin, ister sürekli genişleyen bir dalga  
fonksiyonunun tek bir dalını algıladığınız çoğul dünyalar yoru-  
manu tercih edin, ister Chopra'nın pıhtılaşmış çorba yorumunu  
seçin. Bir kuantum ölçümünün nasıl sonuç vereceğini önce-  
den bilmenin bir yolu yoktur.

Evrenin dalga fonksiyonunun, bütün köpeklerin sağlık du-  
rumlarının mukemmel olduğu, sonsuz bir abur cubur ve vavas  
kosa tavşan kaynağının tadını çıkardığı bir dalı pekâlâ olabi-  
r ama o evrene ulaşmak için ölçüm sonuçlarını etkilemenin bir  
yolu yoktur. Meditasyonun bir yararı olmaz, olumlu düşünmek  
stres halletmenizi sağlamaz, ilaçlar işe yaramaz; evrenin kuantum  
yapısını, bir kuantum ölçümünden belli bir sonuç almak için et-  
kilemenin bilinen bir yolu yoktur, şimdiye kadar hiç bir bilimsel  
çalışma da böyle bir yola dair bir ipucu bulmamıştır. Sırf fena hal-  
de istemekle büyük şeyler başarmak mümkün olsaydı fizikçiler  
kuantum etkilerini göstermekte bu kadar zorlanmazdı; köpekler  
de hiç bisküvi, peynir, tavşan eksikliği çekmezdi.

Meditasyon stres düzeyinizi düşürebilir, olumlu düşünceler  
de ruh halınızı iyileştirebilir, bunların her ikisi de hayattaki du-  
ramunuza dair kendinizi iyi hissetmenizi sağlayıp o tavşanı ya-  
kalayacak enerjiyi verebilir. Ama bunda kuantumla ilgili bir şey  
yoktur; evrenin derin yapısına anlamlı bir biçimde adım atıyor  
değilsinizdir.

"Bak meditasyon konusunda haklısın. Gerçekten de stresimi  
azaltmamı sağlıyor."

"Sen ne zamandan beri meditasyon yapıyorsun?"

"Her zaman yaparım Bende Budalık var. Arka bahçede güneşte meditasyon yapmayı seviyorum "

"Ona meditasyon demezler, uyumak o. Gözlerin kapalı oluyor, üstüne bir de horluyorsun."

"O horlama değil... mantra."

"Saçmaladın iyice Hem senin niye stresin oluyor kı?"

"E benim hayatım çok zor. Oturma odasında mı uyusam salonda mı yoksa büroda mı diye düşünmem gerek Neden bana bakmadığını, bana neden öduller vermediğini de takıyorum kafama."

"Peki, bu kadar yeter. Başımı ağrıتیyorsun "

"Meditasyon yapmalısın!"

## **Dolanıklık Yoluyla Tekinsiz İyileştirme: "Uzaktan İyileştirme"**

Kuantum sahtekârlığının bir başka yaygın biçimi, yerel olmamanın (nonlocality) "alternatif" ya da "geleneksel" tıbbın temeli olduğunu iddia etmektir. Bell'in kuramında ve Aspect deneylerinde görülen korelasyonların, gerçekliğin derin, "aşkın" bir düzeyi olduğunu gösterdiği ileri sürülür. Bu düzeyin, bütün canlılar arasında bir bağlantı yarattığı, pratisyenlerin bu bağlantıyı insanlara dokunmaksızın sorunları teşhis etmek, hatta onları iyileştirmek için kullanabileceği söylenir. Her türden duyu ötesi fenomenin temelının de bu düzeyde olduğu iddia edilir.

Bu fikrin en aşırı versiyonu Jack Angelo'nun kaleme aldığı *Distant Healing* (Sounds True, 2008) gibi kitaplarda bulunur Angelo kitabında şunları ileri sürer

Kuantum mekanığıyla ilgilenen bilim insanları birleşik

alan kuramının kutleçekim, nukleer tepkimeler, elektro-  
manvetik alanlar ve insan bilinci dahil, evrendeki her şeyi  
birbirine bağladığına inanır. O halde modern fizik uzak  
tan iyileştirmenin, düşünce biçimlerinin, orneğin fikirler  
ve enformasyonun bir bilinç ağıyla insanlık ailesinin bir  
kismından bir başka kısmına geçebileceği yönündeki bul-  
gusunu desteklemektedir (Orjinal s. 180-81)

Bunlar da Uçay Yolu düzeyinde laflar. Fizikte "birleşik bir alan  
kuramı" yoktur; hatta birleşik bir alan kuramının yokluğu, mo-  
dern fizikğin önündeki en büyük güçlüklerden biridir. Birleşik bir  
alan kuramı olsaydı bile "insan bilinci" onun içereceği unsurlar-  
dan biri olmazdı.

Bu fikir Tiffany Snow'un *Forward from the Mind Distant He-  
aling, Bilocation, Medical Intuition & Prayer in a Quantum World*  
adlı kitabında (Spirit Journey Books, 2006) daha ayrıntılı bir bi-  
çimde, daha hatalı açıklamalarla etc kemige buründürulmuş

Dolanıklık [bazen yerel olmama da denilir], birbirlerin  
den ne kadar uzak olurlarsa olsunlar bir şekilde birbirle-  
riyle irtibat halinde kalan iki parçacık arasında ışık hızın-  
dan daha hızlı bir sinyalin anında iletilmesidir. Araların-  
da bir galaksi bile bulunsa parçacıklardan birinin başına  
gelen şey, dalga biçimli dolanık bağlantı sayesinde anın-  
da öbür parçacığın da başına gelir. "Büyük Patlama" kura-  
mıyla evrenin başlangıcına bakarsak (biz de dahil) bütün  
enerjinin daha en baştan dolanıklaştığını görürüz; dolay-  
ısıyla birbirimizden ne kadar ayrı olsak da hepimizin bir  
birimizde bir çentigi [orijinalde yazıldığı gibi] var. Daha  
açık bir deyişle birimizin yaptığı başka herkesi etkiler

Snow, sadece bir parça hatalı bir açıklamayla başlıyor ama pa-  
rağrafın sonuna doğru hepten raydan çıkıyor

Yedinci bölümde gördüğümüz üzere dolanıklık gerçekten de  
dolanık parçacıkların halleri arasında yerel olmayan korelasyon-

ları mümkün kılar. Gelgelelim öncelikle bu korelasyonların nasıl  
etkileşimlerle tesis edilmesi gerekir. Örneğin Aspect deneylerin-  
deki fotonlar en başta aynı atom tarafından üretilmiştir.

Bu dolanık parçacıklar arasındaki kuantum bağlantısı son de-  
rece hassastır, evrenin geri kalanıyla etkileşimler yüzünden ko-  
layca kırılır ve eşevresizliğe yol açar. Fizikçilerin bir sanrı olan  
onda biri kadar süren dolanık bir hal yaratmak için bile çok fazla  
çalışmaları gerekir. Dolanıklığa davanan hiçbir bağlantının. Bu-  
yük Patlama'nın üstünden geçen on dört milyar yılda ayakta kal-  
ması mümkün değildir.

Büyük Patlama'dan bugüne kalan bir dolanıklık olmadığı için  
birbirinden ayrı nesneler arasında da ıçkın bir bağlantı yoktur.  
Yedinci bölümde tartıştığımız üzere, iki köpeğin hallerinin birbi-  
riyle ilişkili hale gelmesini kolayca düzenleyebiliriz. Fakat bunu  
ancak bu köpekleri bir araya getirip birbirleriyle etkileşim kar-  
malarını mümkün kılarak yaparız. İki köpek her zaman ayrı-  
sa onları dolanıklaştırmanın bir yolu vardır. Benzer şekilde in-  
san organlarının kuantum etkileri gösteremevecek kadar büyük  
oldukları gerçeğini bir kenara biraksak bile, söz gelimi bir hasta-  
nın karaciğeri ile bir "şifacı"nın elleri arasında hiç temas olmaks-  
ızın bir bağlantı kurmak mümkün değildir.

Dolanıklık homeopatiyi açıklamak için de kullanılır. Homeo-  
pati tedavilerinde, az miktarda bitki ya da zehir suya bırakılır ve  
bitkinin ya da zehrin tek bir molekülünün bile suda kalmayaca-  
ğı derecede çözüldürülür. Bu tedaviyi yapanlar suyun hasta ve  
ne konulan maddenin varlığını "hatırladığını", onun bazı özelli-  
klerini aldığını, bunun o suyu içecek hastaların iyileşmesini sağla-  
yacağını savunur. Dolanıklık bu "hatırla" etkisi için getirilen bir  
açıklamadır. Su ile bitki ya da zehir arasındaki etkileşimin Aspect  
deneylerinde görülen korelasyonlara benzer bağlantılar kurdu-  
ğundan sorulur.

Homeopatiye getirilen kuantum dolanıklığı açıklamasının



zirve çıktığı nokta, Lionel Milgrom'un çalışmaları olmuştur. Milgrom homeopatinin sadece su ile zehir arasında bir dolanıklığı değil, hasta, pratisyen ve ilaç arasında uç yonlu bir dolanıklığı gerektirdiği (o buna 'HPI' dolanıklığı der) şeklinde bir kuram-astırımaya gitmiştir. Milgrom'un kuantum fizığının jargonunu ve hareketler sistemini taklit etme konusunda muhteşem bir yeteneğı vardır, 2006'daki bir makalesinde de şunları yazmıştır

Homeopati ve diğer TAT'larda<sup>3</sup> terapi sürecinin belli özelliklerini resmetmek için kuantum dolanıklığı (ve oradan hareketle enformasyon işleme) kavramlarının kullanılması mümkün olmalıdır. Buna bağlı olarak, homeopati ve diğer TAT'ları kör deneme usulleriyle incelemenin etkileri de böyle bir tablodan sorumlu olmalıdır. Başka bir deyişle çift kör kanıtlamalarda, HPI dolanıklık halının her bir bileşeni iki hallı bir "makro küb" olarak düşünülür. Dolayısıyla homeopatik sürecin makro kuantum "teleportasyon" içerdiği değerlendirilmesinde bulunulabilir (...). Gelgelelim yalnızca dolanık hal, sistemin tamamı hakkında enformasyon içerir. Dolayısıyla dolanık durumu kıran her şey mutlaka, sistemlerin fonksiyonlarının sistemin tamamı olarak bütünleşmesi hakkında enformasyon kaybına yol açacaktır. Açıkır ki böyle bir enformasyon kaybı homeopatinin verimliliğıyle ilgili olarak gerçekleştirilen, ya ilaç ya hastaya da pratisyenin dolanık terapi bağlamından çıktığı çift kör rastgele kontrol denemelerinde<sup>4</sup> de ortaya çıkacaktır<sup>5</sup>.

3. TAT, 'tamamlayıcı ve alternatif tıp' anlamına gelir. Kısaltmalar her şeyin daha bilimsel kokmasını sağlar.

4. Çift kör rastgele kontrol denemeleri, hastanın sinanan tedaviyi ya da plaseboyu almak üzere rastgele seçildiğı, hastanın da hekimin de hangisinin plasebo hangisinin ilaç olduğunu bilmediğı denemelerdir. Bu testler modern tıp araştırmalarında altın standardıdır.

5- Lionel Milgrom, *Evidence Based Complementary and Alternative Medicine* 4, 7-16 (2006). Alıntılar s. 14'ten.

Bu "kuantum" akıl yurutmenin gerçekten nefes kesici bir uygulamasıdır. Milgrom homeopatik ilaçların iyileştirici etkilerini bu "makro kuantum teleportasyon"a atfetmekle kalmaz, hoş bir mantık judosuyla bu açıklamayı, gereği gibi gerçekleştirilmiş klinik denemelerde homeopatik tedavilerin plaseboların onune geçmemesini açıklamak için kullanır. "Goruyorsunuz ya, her şey kuantumdur, bilimsel ilkelerle tutarlı bir tavırla performansı ölçme girişiminde bulunmak her şeyi mahveder. Milgrom standart tıbbi test protokollerinin homeopatıyı ölçmek için kullanılamayacağı, "çünkü bunların, araştırmayı amaçladıkları etkileri ortadan kaldırıyormuş gibi görüldüğü" sonucuna varır, etkileyici bir girişimde bulunarak bugün tıbbi tedaviye uygulanan kesin standartları karşılamaktan (muhtemelen tunelleme ya da ısınlanma yoluyla) kaçınmak için kuantum mekanığına başvurur.

Dolanıklığın homeopatıyı açıkladığı iddiası, tam bir zirvalıktır. Hastalar ve pratisyenler kuantum davranışı gösteremeyecek kadar büyüktür, ayrıca bir solusyondaki moleküller arasında bir dolanıklık etkileşimi kurulması yolunda kuçucuk bir olasılık var olsa bile dolanıklık sadece iki sistemin halleri arasında bir korelasyondur, bir atom belli bir halde olduğunda bir foton dikey polarize olur ya da bir köpek uyanıksa öbür köpek de uyanıktır. Bu, bir sistemin diğer sistemin özelliklerini aldığı anlamına gelmez. Bir kuantum etkileşimi bir atom ile bir foton arasında bir korelasyon yaratabilir, ama bir atomu bir fotona ya da suyu iyileştirici bir iksire çeviremez; tıpkı iki köpek arasındaki bir etkileşimin bir Labrador retriever'i bir Boston terrier'ye çeviremeyeceği gibi.

## Kötü Sincaplardan Uzak Durun: Kuantum Fiziği Sihir Değildir

233

Kuantum mekaniği tuhaf ve harika bir kuramdır; bazı inanılmaz şeyleri mümkün kılmıştır. Modern teknolojinin büyük bir bölümü şu ya da bu biçimde kuantum mekaniğine dayanır, modern elektronik aygıtlar ve bilgisayar yongalarının işleyişi kuantum etkilerine dayanır; lazerler ve modern telekomünikasyonda kullanılan LED'ler, esasen kuantum aygıtlarıdır. Kuantum kuramı, geleceğin teknolojilerini besleme konusunda da inanılmaz bir potansiyele sahiptir; problemleri klasik bilgisayarlardan daha hızlı çözebilen kuantum bilgisayarlar ya da kırılmaz şifrelere başvurarak mesajları koruyan kuantum kriptografi sistemleri gibi.

Sonuçları ne kadar şaşırtıcı olursa olsun, kuantum mekaniği mucizeler için bir dayanak oluşturmaz. Tahminleri günde bir kez gilerimize aykırıdır; ama kuram sağduyuyu tam anlamıyla aşmaz. Binleri kulaga gerçek olamayacak kadar iyiymiş gibi gelen sonuçlar vaat ediyorsa muhtemelen ya kendilerine ya size yalan söylüyorlardır. Açıklamaya birkaç kuantumlu sözcük eklemek bedava enerjiyi ya da ebedi gençliği daha akla yatkın hale getirmez.

Kuantum kuramının burada bahsetmediğimiz birçok buyulevici yönü vardır. Dünyada da keçi sakallı ya da sakalsız birçok kötü sincap vardır. Kuantum etkileriyle ilgili iddialar hakkında dikkatli düşünün ve tuhaf olsa da kuantum mekaniğinin sihir olmadığını unutmayın. Boyle yaparsanız kuantum evreninin muhteşem yönlerini keşfetme, şarlatanlardan ve çatlaklardan kaçınma konusunda hiç sıkıntı çekmezsiniz.

"Vay be ahbap, bu çok sıkıcı."

"Nedenmiş? Kuantum kuramının iyi olması için sihirli olması gerekmiyor ki."

"Hayır canım, onu demiyorum. Dolandırıcılardan bahsediyorum. Sincapların kötü olduğunu biliyordum, ama bu kadar kötü

insanlar olduğunu bilmiyordum

"Evet iyi bir kuramın böyle sunulmuş olduğunu görmek insan biraz uzuyor. Ama bir bakıma bir ilerleme işareti sayılabilir."

"Nereden çıkardın şimdi bunu?"

"Donup de 1800'lere bakarsan insanların elektrikle ilgili aynı sihirli iddialarda bulunduğunu görebilirsin. Sırf elektrikle çalışıyorlar diye buçuk akıl almaz aygıtın sihirli şeyler yaptığı ileri sürülüyordu."

"Yok ya?"

"1900'lerin ortalarında da onun verimi atom enerjisi yani nükleer enerji aldı. İnsanlar en saçma işlerde nükleer enerji kullanıldığını iddia ediyorlardı, çok sayıda dolandırıcılık vakası da atom enerjisine dayandırılıyordu."

"Hadi ya? Ne demeye çalışıyorsun?"

"Artık insanlar bunların hiçbirine inanmıyor. Elektriğe ve nükleer enerjiye alıştık, insanlar artık onlarla ilgili saçma iddialara kulak asmıyor."

"Yani 'kuantum' da bugünün 'nükleer'i mi?"

"Büyük ölçüde. Artık eski açıklamalar işe yaramadığından dolandırıcıların bir açıklama olarak 'kuantum'a başvurması gerekiyor. Yani bir anlamda insanların 'kuantum' lafını kullanması, genel olarak kamuoyunun zaman içinde sağlığını biraz yitirdiği anlamına geliyor. 'Kuantum' lafı hala işe varıyor, çünkü insanların çoğu ne anlama geldiğini bilmiyor."

"Yani daha fazla insana kuantumu öğretmen gerekiyor."

"Kesinlikle. O yüzden de bu kitabı yazdım."

"Ben de yardım ediyorum! Ben kamuya hizmet eden bir köpeğim!"

"Çok iyi bir köpeksin sen."

"Kitap bu kadar mı peki?"

"Hemen hemen. Neden?"

"Tger bitirdiysen vuruyuşe çıkabilir miye?"



"Tabii "

"Kötü sincaplarla karşılaşırsak da "

"Kötü sincaplarla karşılaşırsak onları ısrabılırsın "

"Ooo "

## Önemli Terimlerin Sözlükçesi

**Belirsizlik ilkesi / Heisenberg belirsizlik ilkesi.** Birbirini tamamlayan özelliklerin ölçülebilme kesinliğini sınırlayan bir dizi matematiksel ilişkiden biri. En bilinen belirsizlik ilkesi momentum ile konum arasındadır, bir tavşanın hem nerede olduğunu hem ne kadar hızlı hareket ettiğini kesin olarak bilmenin imkânsız olduğuna söyler. Konumu daha kesin olarak belirleme yönünde bir genişim momentumdaki belirsizliğin artmasına yol açar; aynı şey tersi için de geçerlidir. Enerji-zaman belirsizliği ilişkisi de önemlidir çünkü kuantum elektrodinamiğinde sanal parçacıkların var olabileceği süreyi belirler.

**Bell kuramı:** John Bell'in dolanık kuantum parçacıklarının durumları arasında hiçbir yerel gizli değişken kuramının uyamayacağı biçimlerde korelasyon kurulacağını göstererek kanıtladığı matematiksel kuram.

**Çoğul dünyalar yorumu:** 1950'lerde Princeton'da Hugh Everett'in kuantum mekaniği için geliştirdiği felsefi çerçeve. Çoğul dünyalar yorumu, bütün olası ölçüm sonuçlarının dalga fonksiyonunun farklı dallarında alındığını söyleyerek Kopenhag yorumunun "dalga fonksiyonunun çöküşü" sorunundan kaçınır, dalga fonksiyonunun bir yerinde bütün köpekler bifttek yer. Üzücüdür ki bizler dalga fonksiyonunun tek bir kolunu algılarız. Diğer kollar uyum bozulması yüzünden etkili bir biçimde birbirinden ayrılmış evrenlerdir. Uyum bozulması farklı kolların birbirleri üzerinde ölçülebilir bir etkiye bu-

lunmasını engeller.

**Dalga fonksiyonu:** Karesi, bir nesneyi izimli durumlardan birinde bulma olasılığını veren bir matematiksel fonksiyon. Kuantum mekanığında bütün nesneler dalga fonksiyonlarıyla betimlenir.

**Dolanıklık:** İki nesne arasında, bir nesnenin durumunu ölçmenin diğerinin durumunu belirleyeceği şekilde bir korelasyon kurulmasıyla oluşan "bağlantı". Aynı odada bulunan iki köpek klasik bir benzetme olabilir. Bir köpeğin uyanık olduğunu ölçerseniz hemen diğerinin de uyanık olduğunu bilirsiniz. Kuantum parçacıkları için de benzer korelasyonlar vardır; fakat kuantum parçacıklarının durumları iki parçacıktan biri ölçülene kadar belirsizdir, ölçüm yapıldığında birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar her iki parçacığın da durumu anında belirlenir.

**Durum/kuantum durumu:** Bir nesneyi tanımlayan özellikler (konum, momentum, enerji vs.) koleksiyonu. Örneğin "oturma odasında uyumak", "mutfakta uyumak" ve "evin içinde koşmak" bir köpeğin izimli üç farklı durumudur.

**Einstein, Podolsky ve Rosen (EPR) paradoksu.** Albert Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen'in kaleme aldığı, kuantum mekanığının eksik olduğunu kanıtlamak için dolanık parçacıkların kullanıldığı ünlü makale. Bell kuramını sınavan deneyler bu makaledeki argümanın yanlış olduğunu kanıtlamıştır, fakat bu argüman kuantum ışınlamanın ve başka kuantum enformasyon teknolojilerinin gelişimine yol açmıştır.

**Enerji.** Bir nesnenin kendi hareketini ya da bir başka nesnenin hareketini değiştirme becerisinin ölçüsü. Enerjinin birçok biçimi vardır: kinetik enerji, potansiyel enerji ve kütle enerjisi gibi (Einstein'in  $E=mc^2$ 'si). Enerji bir biçimden diğerine çevrilebilir, ama yaratılamaz ya da ortadan kaldırılamaz.

**Enerji-zaman belirsizliği:** Heisenberg belirsizlik ilkesinin bir versiyonu, bir nesnenin hem enerjisini hem de enerjisinin ölçüldüğü zamanı kesin olarak bilmenin imkânsız olduğunu söyler. Buda kuan-

nam elektrodinamiğindeki sanal parçacıkların omrunu sınırlar

**Enerjinin korunumu:** Enerjinin korunumu kanunu, enerjinin bir birmenden diğerine geçebileceğini, fakat bir sistemin toplam enerjisinin her zaman aynı kalacağını söyler. Örneğin bir köpek, bir sincabı kovalarken yediklerinde depolanmış potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirir; ama yiyeceğindeki toplam enerjiden daha fazla kinetik enerji kazanamaz.

**Eşevrelilik (coherence / eşfazlılık):** Dalgalar ya da dalga fonksiyonlarının bir özelliği, kabaca dalgaların sanki bir tek kaynaktan geliyor-muş gibi davranması olarak tanımlanır. Eşevreli iki dalganın birbirine eklenmesi net bir girişim örüntüsü verir, uyumu bozulmuş iki dalganın eklenmesi, hızla değişerek sığışan ve belirsiz hale gelen bir girişim örüntüsü verir. "Uyum bozulması" süreci daha geniş bir çevreyle rastgele ve dalgalanan etkileşimler yoluyla bir tek kaynaktan gelen iki dalga arasındaki eşevreliliği ortadan kaldırır.

**Feynman diyagramı.** Işıkla etkileşime giren yüklü bir parçacık için olası olaylar dizisini gösteren tablo. Her diyagram kuantum elektrodinamiğinde bir hesaplamayı temsil eder; ışıkla etkileşim içine giren parçacığın enerjisi, o parçacık için olası bütün diyagramların birbirine eklenmesiyle bulunur. Diyagramlar hesaplamalarda kullanılan kesirme bir yol olarak bunları icat eden Richard Feynman'ın adını taşır.

**Fotoelektrik etki:** 1800'lerin sonlarında keşfedilmiş bir etki, bir metalin üzerine düşen ışığın elektron çıkarması. Einstein fotoelektrik etkiyi 1905'te, Planck'ın kuantum hipotezini doğrudan ışığa uygulayıp bir ışık huzmesini bir foton akışı olarak betimleyerek açıklamıştır.

**Foton.** Bir "ışık" parçacığı. Bir ışık parçacığı, upkı bir köpeğin kasesine dökülen mamalar gibi bir parçacık akışı olarak düşünülebilir. Her fotonun enerjisi, ışığın rengiyle ilişkili frekansın Planck sabitıyla çarpılmasıyla bulunur ( $E=hf$ ).

**Girişim:** İki ya da daha fazla dalganın birbirine eklenmesiyle ortaya



çıkan fenomen Bir dalganın tepeleri diğerinin tepeleriyle örtüşüyor sa ("aynı fazdaysa") sonuç çok daha büyük bir dalgadır Bir dalganın tepeleri diğerinin çukurlarıyla örtüşüyorsa ("zıt fazlıysa") sonuç ortada bir dalga olmamasıdır Tek tek parçacıkların bulunduğu girişim örüntüleri kuantum davranışının en açık örnekleridir

**Görehlilik:** Albert Einstein'ın kutleçekimi ve ışık hızına yakın hızlarda yol alan nesnelerin davranışlarını betimlemek için geliştirdiği kuram

**Hawking ışınlama:** "Sanal parçacıkların" kara deliklerin kaybolup gitmesine yol açtığı bir süreç Bir parçacık-karşıt parçacık çifti bir kara deliğin kenarında belirdiğinde ikisinden biri kara deliğin içine düşerken diğeri kaçabilir Enerjini korumak için kara deliğin minicik bir parça kutle kaybetmesi gerekir Her seferinde bir parçacıkla yontula yontula zamanla kara delikten geriye hiçbir şey kalmaz

**İzinli durum.** Kuantum mekanığında bir nesnenin ölçülebileceği sınırlı sayıda durumdan biri Örneğin dinlenen bir kopek ya yerde bulunabilir ya da kanepede, ama asla yerle kanepede arasında bir yerde bulunamaz

**Jiromanyetik oran / "g-faktörü":** g sembolüyle temsil edilen, bir elektronun bir manyetik alanla nasıl etkileşim kurduğunu belirleyen rakam En basit kuantum mekanığı kuramı, g-2 tahmininde bulunur, fakat kuantum elektrodinamığı çok küçük bir miktar daha yüksek bir değer tahmin eder g'nin deneysel olarak ölçülmüş değeri kuantum elektrodinamığının tahminıyla on dört ondalık basamaga kadar uygunluk gösterir

**Karşıt madde:** Evrendeki her parçacığın onunla aynı kutle ve tersi elektrik yüküne sahip bir karşıt madde eşdeğeri vardır Sıradan bir madde parçacığı karşıt parçacığıyla karşılaştığında, ikisi birbirini ortadan kaldırır ve kutleleri enerjiye döner

**Kırılma.** Dalgalara özgü bir davranış dar bir açıklıktan ya da bir engel etrafından geçen dalgalarda uzaya doğru yayılır Bir kopek bir patates cipsinin mutlak zeminine düştüğünü oturma odasından duyar çünkü ses dalgaları mutlak kapısında ve köşelerde kırılır

**Kinetik enerji:** Hareket eden nesnelerle ilişkili enerji. Gündelik nesneler için kinetik enerji, kütleyle hızın çarpımının karesinin yarısına eşittir ( $1/2 mv^2$ ). Bir Danua'nın kinetik enerjisi onunla aynı hızda hareket eden bir Chihuahua'nın enerjisinden daha fazladır, hiperaktif bir Sibirya kurdunun kinetik enerjisi de onunla aynı kütleye sahip uykuocu bir bloodhound dan daha fazladır.

**Klasik fizik:** Yaklaşık 1900'den önce geliştirilmiş, gündelik nesnelerin davranışlarını betimleyen fizik kuralları. Kilit bileşenleri Newton'ın hareket kanunları, Maxwell'in elektrik ve manyetizma denklemleriyle, termodinamik kanunlarıdır.

**Kopyalanmama kuramı:** Durumunu önceden bilmeksizin bir kuantum nesnesinin mükemmel bir kopyasını çıkarmanın imkânsız olduğunu gösteren matematiksel kuram.

**Kopenhag yorumu:** Niels Bohr ile Danimarka'daki enstitüsündeki meslektaşlarının kuantum mekaniği için geliştirdiği felsefi çerçeve. Kopenhag yorumu kuantum mekaniğinin betimlediği mikroskobik sistemlerle klasik fizikğin betimlediği makroskobik sistemler arasında mutlak bir ayrım olduğunda ısrar eder. Mikroskobik kuantum sistemiyle makroskobik bir ölçüm aygıtı arasındaki etkileşim dalga fonksiyonunun o sistem için izizli durumlardan birine "çökmesine" yol açar.

**Kuantum alan kuramı:** Işık hızına yakın hızlarda hareket eden parçacıkları ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimleri kapsayabilmek için kuantum kuramını Einstein'ın görelilik kuramıyla birleştiren bir kuram. En basit kuantum alan kuramı kuantum elektrodinamığıdır.

**Kuantum bilgisayarı:** Klasik bir bilgisayardaki gibi sadece "0" ve "1" gibi değerlerini değil, "0" ve "1" in süperpozisyonlarını da alan "kubitler" den oluşan bilgisayar. Böyle bir bilgisayar büyük sayıların çarpanlarının alınması gibi bazı problemleri klasik bir bilgisayardan daha hızlı çözebilir. Büyük sayıların çarpanlarının alınması modern kriptografinin temelini oluşturur. dolayısıyla bir kuantum bilgisayarı n kötü bir sincabın kuş yemi alabilmek için kredi kartı işlemlerinizin

şifresini kırmasını ve banka hesabınızı boşaltmasını mümkün kılar

**Kuantum elektrodinamiği** Kısaca QED Yukarı parçacıklar ile ışık arasındaki etkileşimi tanımlayan Richard Feynman, Julian Schwinger ve Shin'ichi Tomonaga'nın 1950'lerde geliştirdiği bir kuram Feynman'ın geliştirdiği etkileşimleri sanal parçacıklar arasındaki alışverişle açıklayan formülasyon bu kuramın en tanınmış versiyonudur

**Kuantum mekaniği / kuantum fiziği / kuantum kuramı** Bu kitabın konusu, kuantum mekaniği yirminci yüzyılın ilk yarısında geliştirilmiştir atomların moleküllerin atomaltı parçacıkların ışığın davranışlarını ve bunlar arasındaki etkileşimleri tanımlar

**Kuantum silici** Kuantum ölçümünün bir kanıtı bir parçacığın tam olarak ne kadar vol aldığının ölçülmesi mümkün kılınarak bir girişim örüntüsü ortadan kaldırılır ama sonra ölçümü karıştıracak bir şeyin yapılmasıyla girişim örüntüsü geri kazanılır

**Kuantum sorgulaması** Bir nesnenin varlığını bir tek foton bile vurmasına izin vermeksizin tespit etmek için kuantum Zeno etkisini kullanan teknik Tavşan takibine uygulanmasını her köpek biliyor olsa gerektir.

**Kuantum ışınlanma** Bir kuantum parçacığının durumunu, parçacığı ölçmeden ya da hareket ettirmeden dolanık parçacıklardan yararlanarak bir veriden diğerine tam olarak aktarma proseduru Maalesef köpeklerin kendilerini kolayca sincap yakalayabilecekleri yerlere ışınlanmalarını mümkün kılmaz.

**Kuantum Zeno etkisi** Kuantum ölçümünün bir kanıtı bir nesnenin durumu tekrar tekrar ölçülerek durum değiştirmesi engellenir. Kask eşdeğeri, sahibinin kestirmesini "Uyuyor musun?" sorusuyla sürekli engellenen bir köpektir

**Modern fizik** Yaklaşık 1900'den sonra geliştirilmiş başta görecelik ve kuantum mekaniğinden oluşan fizik kuramları

**Momentum** Bir çarpışma sırasında neler olacağını belirleyen, bir





ğın geçme olasılığı açıya bağlıdır

**Potansiyel enerji** Hareket etmeyen, ama hareket etmeye başlama potansiyeline sahip bir nesneyle ilişkili enerji. Bir köpeğin uyurken bile potansiyel enerjisi vardır, en ufak bir sesle bile sıçrayıp ortada bir şey yokken havlamaya başlayabilir

**Sanal parçacık** Feynman diyagramında, doğrudan ölçülemeyecek kadar hızlı belirip kaybolan bir parçacık. Bu parçacıklar genellikle bir normal parçacık ve bir karşı madde parçacık olarak belirir, çoğunlukla da bir elektron ve bir pozitron olarak. Prensipte, her şey, peynirden yapılmış bir tavşancık bile bir sanal parçacık olarak ortaya çıkabilir.

**Schrödinger denklemi** Fizikçilerin bir kuantum sisteminin dalga fonksiyonunu bulmak ve zaman içinde sistemin nasıl değiştiğini tahmin etmek için kullandığı matematiksel formül

**Schrödinger'in kedisi** Erwin Schrödinger'in ileri sürdüğü, kuantum superpozisyonlarının saçmalığını göstermeyi amaçlayan bir düşünce deneyi. Schrödinger bir kedinin bir saat içinde onu öldürme olasılığı yüzde 50 olan bir aygıtla birlikte bir kutuya kapatıldığını düşünmüştü, kuantum fiziği bu bir saatin sonunda halı ölçülunceye kadar kedinin hem olu hem dırı olduğunu söyler. Bu deney Schrödinger'i köpek fizikçilerin kahramanı yapmıştır

**Sıfır noktası enerjisi:** Maddenin dalga niteliği sayesinde, bir kuantum nesnesinde her zaman var olan çok çok az miktarda enerji. Sınırlanan kuantum nesneleri hiçbir zaman tam anlamıyla hareketsiz olmaz, tıpkı bir sepetin içindeki köpek yavruları gibi uyuyorken bile sürekli kıpır kıpır dolanıp yer değiştirirler

**Süperpozisyon hali.** Kuantum mekanığında bir ölçüm yapılana kadar bir nesne iki ya da daha fazla izinli durumun superpozisyonunda bulunabilir. Bu superpozisyon durumları, sistem bir tek izinli durumda ölçülebilse bile, deneysel olarak tespit edilebilecek girişim örüntülerine yol açar

**Termal radyasyon:** "Kara cisim radyasyonu" da denir; sıcak bir nesnenin saldığı ışık; bir ocağın üstündeki kızgın tavanın kızıl ışığı gibi. Bu ışığın tayfı, sadece nesnenin ısısına dayanır. Bu tayfı açıklaması, Max Planck'ın kuantum mekanığının açılışını yapmasını beraberinde getirmiştir.

**Tunelleme:** Bir engeli aşacak kadar enerjisi olmayan bir kuantum parçacığının, yine de engeli aşıp tıpkı bir çitin altına çukur kazan kötü bir köpek gibi öbür tarafta belirivermesi.

**Uyum bozulması (decoherence):** Çevreyle rastgele, dalgalanan etkileşimlerin bir kuantum parçacığı için bir girişim örüntüsü görme becerimizi ortadan kaldırdığı süreç. Uyum bozulması özellikle çoğul dünyalar yorumu açısından önemlidir; evrenin dalga fonksiyonunun farklı dallarının birbirlerini etkilememesini sağlar. [ç.n.: Bu terim için tam bir Türkçe karşılık bulunmuyor. Bilim ve Teknik dergisinin *Yeni Yüzyıl Yeni Fizik* başlıklı sayısında (Nisan 1999) Prof. Dr. Tekin Dereli ve Raşit Gürdilek'in aynı adlı makalelerinin "Kuantumda Gerçek Çok" bölümünden yararlanarak "uyum bozulması" terimini benimsedim.]

**Yarı klasik argüman:** Fiziksel bir sistemin, büyük ölçüde klasik fiziğe dayanan, tek tek vakalarla ilgili olarak birkaç modern fikri bir araya getiren betimlemesi. Yarı klasik model örnekleri arasında "Heisenberg mikroskobu" ile Bohr'un hidrojen modeli yer alır.

**Yerel gizli değişken kuramı:** Einstein, Podolsky ve Rosen'in tercih ettiği türden bir kuram. Bir yerel gizli değişken kuramında bir konumda yapılan ölçümler başka konumlarda ("yerel") yapılan ölçümlerden bağımsızdır ve parçacıklar kesin değerleri bilinmese ("gizli değişkenler") de her zaman kesin durumlardadır. Yerel gizli değişken kuramları kuantum mekanığının bütün tahminleriyle aynı sonuçları vermez (Bell kuramına göre); başka deneylerin yanı sıra Alain Aspect'nin yaptığı deneylerle yanlış oldukları kanıtlanmıştır.



## Teşekkürler

Bu kitapta betimlenen fiziği yaklaşık yirmi yıllık bir süre zarfında çok sayıda öğretmenimden ve meslektaşımından öğrendim. Bill Phillips, Steve Rolston, Paul Lett, Kris Helmerson, Ivan Deutsch, Aephraim Steinberg, Luis Orozco, Paul Kwiat, Mark Kasevich, Dave DeMille, Seyfie Maleki, Kevin Jones, Jeff Strait, Stuart Crampton ve Bill Wootters'a çok teşekkür ederim. Açıklamalarındaki bütün iyi kısımların ardında onlar vardır; hatalarsa bana aittir.

Kitabın ilk taslaklarından birini okuyan yılmaz okurlarım Jane Acheson, Lisa Bao, Aaron Bergman, Sean Carroll, Yoon Ha Lee, Matt McIrvn ve Frances Moffet'ten çok yararlı yorumlar aldım. Michael Nielsen ve David Kaiser de taslaklar üzerine yararlı yorumlarda bulundular. Hepsi de bu kitabın, daha iyi bir kitap haline gelmesine katkıda bulundu.

Bu kitap "Uncertain Principles" (Belirsiz İlkeler) başlıklı weblog'umdaki (<http://scienceblogs.com/principles>) birkaç yorumla başladı; o yorumlar nihayetinde dördüncü ve dokuzuncu bölümün başlarındaki diyaloglara dönüştü. ScienceBlogs'daki arkadaşlarım Christopher Mims, Katherine Sharpe, Erin Johnson ve Arikia Millikan'a bana bir platform sundukları; Boing Boing'deki Cory Doctorow'a ve Digg'deki insanlara blogumdaki yorumları yaygınlaştırdıkları için teşekkür ederim. Barrett Garese, Erin Ho-


sier ve Patrick Nielsen Hayden köpeğimle birlikte bir fizik kitabı yazmanın iyi bir fikir olduğuna beni ikna ettiklerinden teşekkürü hak ediyorlar. Kitaba şekil verilmesine ve benim fizikteki hiçbir şeye benzemeyen yayın sürecinde yolu bulmama yardımlarından dolayı editörüm Beth Wareham ve ajansım Erin Hosier'ye çok teşekkür ederim.

Emmy, New York'ta Menands'taki Mohawk & Hudson River Humane Society barınağından alındı. (<http://www.mohawkhumanesociety.org>) Çoğu hayvan barınağı gibi orası da harika köpeklerin (ve başka hayvanların) bulunduğu mükemmel bir kaynak; köpek almayı düşünenler varsa civarlarındaki hayvan barınaklarına bir uğramalarını tavsiye ederim.

Yıllar içinde birçok köpekle tanışma şansını yakaladım: Patches, Rory, Truman, merhum muhteşem RD, Bodie, Tinker. Bu kitapta hepsinden bir parça var. Fakat takdirin çoğu hiç tartışmasız gelmiş geçmiş en iyi Emmy olan Niskayuna Kraliçesi Emmy'ye.

Bu işi biraz tuhaf bulmakla birlikte bana muazzam bir destek veren dostlarıma ve aileme çok teşekkür ederim. Son olarak eşim Kate Nepveu'ya sayılamayacak kadar çok taslağı okuyup nazikçe gramerimi düzelttiği, ortalığa saçtığım fikirleri sabırla dinlediği; Claire bebeğe de işleri olabilecek en güzel biçimde karıştırdığı, her şeyden de önce köpekle aptalca sohbetlere giriştiğimde attığı kahkahalarla ilham verdiği için teşekkür ederim. O olmasaydı kelimenin tam anlamıyla bunların hiçbirisi olmazdı.





## **KÖPEĞİNİZE KUANTUM FİZİĞİNİ NASIL ÖĞRETİRSİNİZ?**

**CHAD ORZEL**

Kuantum fiziği herhalde en ilginç, en gizemli bilimsel konudur; sevimli bir köpekle yapılan Sokratik bir tartışmanın onun örtüsünü kaldıracağını kim bilebilirdi?

**Cory Doctorow**

Orzel'in kuantum fiziğine mizah dolu yaklaşımı nefis; Emmy de bu son derece gizemli mevzunun incelikleri hakkında hepimizin sormak istediklerini soran mükemmel bir köpek.

**Jennifer Oullette**

Bu küçük çekici kitap modern bilimin en tuhaf ve en önemli konularından birini öğrenmenin en eğlenceli yolu.

**William D. Phillips, 1997 Fizik Nobel Ödülü sahibi**

Chad Orzel ve sevgili köpeği Emmy sayesinde nihayet Heisenberg kesinsizlik ilkesini anladım! Emmy'nin herhalde benden daha çabuk kavradığı kritik önemdeki diğer fikirlerin lafını bile etmiyorum. Köpeğinize Kuantum Fiziğini Nasıl Öğretirsiniz, modern fizik hakkında en ufak bir fikri olmayan insanlar için bile bir lütuf.

**Spencer Quinn**

